SCCS

Системы управления, связи и безопасности

Systems of Control, Communication and Security

№4 2015

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

№ 4
IV квартал 2015 г.

© ООО «Корпорация «Интел Групп», 2015

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

Феоктистов А.Г. Методология концептуализации и классификации потоков заданий масштабируемых приложений в разнородной распределенной вычислительной среде 1
Кузовкова Т.А. Оценка роли инфокоммуникаций в национальной экономике и выявление закономерностей их развития 26
Левин В.И. Логико-алгебраический подход к моделированию конфликтов 69
Семенов С.С., Алисевич Е.А., Педан А.В., Смолеха А.В. Постановка задачи на разработку модели функционирования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления объединения в период непосредственной угрозы агрессии 89
Зацаринный А.А., Козлов С.В., Шабанов А.П. Об информационной поддержке деятельности в системах управления критическими технологиями на основе ситуационных центров 98
Журков А.П., Аминев Д.А., Гусева П.А., Мирошниченко С.С., Петросян П.А. Анализ возможностей применения подходов самодиагностирования к распределенной радиотехнической системе наблюдения 114
Левин В.И. Интервальный подход к оптимизации в условиях неопределенности 123
Догадина Е.П., Кропотов Ю.А. Определение парето-оптимального множества реализации работы на примере применения генетического алгоритма 142
Кропотов Ю.А., Белов А.А. Исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена 150
Кропотов Ю.А. Модель одномерной функции плотности вероятности речевых сигналов 158
Данилевич С.Б. Достоверность результатов многопараметрического измерительного контроля 171
Демин А.В. Адаптивное управление роботами с модульной конструкцией 180
Евгенев Г.Б., Кузьмин Б.В., Рубахина В.И. Методы и средства управления жизненным циклом изделий машиностроения 198
Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа PA/M/1, H2/M/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой 217
Кропотов Ю.А., Ермолаев В.А., Белов А.А. Адаптивный алгоритм компенсации эхо-сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена 252
Левин В.И. Устойчивость решения оптимизационных задач в условиях неопределенности 260

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 – 11,9 Мб.
Комплектация издания – 1 CD.
Тираж 100 экз.

УДК 004.722

Методология концептуализации и классификации потоков заданий масштабируемых приложений в разнородной распределенной вычислительной среде

Феоктистов А. Г.

Постановка задачи: *современные распределенные вычислительные среды характеризуются высокой конкуренцией пользователей за общие ресурсы этих сред, возникающей в процессе выполнения пользовательских заданий. Проблема оптимального выделения ресурсов заданиям актуализирует решение задач выявления, описания, классификации и применения информации о характеристиках ресурсов и заданий. В настоящее время традиционные системы управления ресурсами для распределенных вычислительных сред не обладают всеми необходимыми средствами для эффективного решения вышеперечисленных задач.* ***Целью работы*** *является разработка методологии концептуализации и классификации потоков заданий масштабируемых приложений в распределенных вычислительных средах, включающей специализированные модели и методы представления и использования знаний о заданиях и ресурсах, а также технологию практического применения этих моделей и методов.* ***Используемые методы****: в процессе классификации заданий и их потоков применяется признаковое описание классифицируемых объектов с использованием числовых и нечисловых характеристик. В случае классификации заданий в качестве признаков используются вычислительные характеристики заданий, при классификации потоков заданий – структурные и поведенческие характеристики этих потоков. Распознавание свойств заданий и их потоков осуществляется с помощью набора специализированных характеристических функций. Детальная настройка требований, содержащихся в классифицированных заданиях, осуществляется на основе методов конкретизирующего программирования.* ***Новизна:*** *аналоги предложенных в статье средств классификации заданий и их потоков в используемых на практике системах управления ресурсами для распределенных вычислительных сред автору неизвестны.* ***Результат****: использование представленных средств классификации заданий и их потоков в качестве надстройки к системе управления ресурсами позволяет существенно улучшить результаты распределения этих ресурсов.* ***Практическая значимость****: результаты моделирования показывают, что применение разработанных систем классификации заданий и их потоков позволяет оптимизировать распределение вычислительных ресурсов и обеспечивает существенное повышение ряда важных показателей эффективности функционирования распределенной вычислительной среды. Практическое использование этих систем подтверждает полученные модельные результаты.*

Ключевые слова: *распределенная вычислительная среда, масштабируемые приложения, потоки заданий, концептуализация и классификация.*

Ведение

На основе анализа тенденций развития, организации и использования современных разнородных распределенных вычислительных сред (РВС) [1-4] можно сделать вывод, что в последнее десятилетие особую актуальность приобрели исследования, связанные с проблемой усиления предметной ориентации технологий организации таких сред. Движение в этом направлении обусловлено необходимостью все более эффективного интегрированного использования разнородных ресурсов РВС, а также высокоуровневой поддержки пользователей-«предметников» в процессе разработки и запуска масштабируемых приложений. Особое внимание специалистов в области высокопроизводительных вычислений уделяется развитию фундаментальных основ организации распределенных вычислений при решении

крупномасштабных научных задач различных предметных областей, а также разработке новых методов и алгоритмов управления масштабируемыми вычислениями и организации вычислительного процесса в на базе гетерогенных ресурсов РВС в условиях динамически изменяющейся производительности этих ресурсов [5-7]. Высокая конкуренция заданий за общие ресурсы РВС приводит к необходимости всестороннего учета характеристик этих ресурсов в процессе их распределения с целью достижения требуемого качества выполнения задания [8]. Особую актуальность имеют исследования связанные с вопросами многокритериальной оценки качества вычислительных работ (сервисов), обеспечиваемого ресурсами в процессе выполнения задания [9-11].

Необходимость создания масштабируемых приложений возникает при выполнении многовариантных расчетов, решении широкого спектра переборных задач и многих других. Предполагается, что масштабируемое приложение включает набор прикладных программ для параллельного решения задачи с помощью различных вычислительных единиц (например, ядер) разнородных узлов РВС и порождает комбинированный поток, объединяющий задания для этих прикладных программ. При этом вычислительная нагрузка, связанная с решением задачи, распределяется между вычислительными единицами разнородных узлов РВС, а время выполнения заданий комбинированного потока уменьшается обратно пропорционально числу используемых вычислительных единиц с учетом их производительности в составе конкретного узла. Создание системы управления комбинированными потоками заданий для распределенной программной системы является нетривиальной и весьма актуальной проблемой. Для успешного решения этой проблемы необходимо, чтобы пользовательские приложения такого рода включали возможности, во-первых, мониторинга состояния узлов РВС (их доступности, готовности, надежности, параметров очередей, статусов запущенных заданий и др.) и гибкого управления заданиями (учета требований к вычислительной системе, запуска, рестарта и миграции заданий, поддержки механизмов создания контрольных точек), во-вторых, динамической декомпозиции исходной задачи на подзадачи на основе анализа алгоритмов решения задачи и вычислительных характеристик узлов, назначения этих узлов для решения в них подзадач и последующей генерации потоков заданий для прикладных программ, размещенных в выбранных узлах.

Основные понятия классификации заданий

Задача в самом общем смысле – это ситуация, определяющая действия некоторой решающей системы, в состав которой входят и люди, и автоматы (машины) [12]. Чтобы осуществить решение задачи, такая система должна обладать средствами и способами решения. Основными этапами процесса решения задачи являются [13]:

- постановка задачи;
- построение плана решения задачи;
- выполнение процесса решения задачи в соответствии с планом;

- анализ результатов решения задачи.

К вычислительным задачам, относятся задачи, процесс решения которых осуществляется путем взаимодействия пользователя (специалиста предметной области) с вычислительной системой. Процесс решения вычислительной задачи характеризуется, как правило, относительно небольшим набором данных и большим объемом вычислений, выполняемых над этими данными, и включает два основных этапа:

- формирование задания вычислительной системе для решения задачи;
- выполнение этого задания в вычислительной системе.

Задание представляет собой спецификацию процесса решения задачи, содержащую информацию о требуемых вычислительных ресурсах, исполняемых прикладных программах, входных/выходных данных, а также другие сведения, необходимые вычислительной системе для успешного выполнения процесса решения задачи. Множество заданий пользователя, поступающих в вычислительную систему, составляют поток заданий, который в дальнейшем может сливаться с потоками заданий других пользователей, образуя новые потоки. Поток заданий характеризуется следующими свойствами: мощность и структура потока, порядок поступления и обслуживания заданий, степень изменения перечисленных свойств во времени, характер взаимосвязи заданий, уровень платформенной независимости приложений, выполнение которых требуется в задании. Задания могут объединяться в пакеты – конечные наборы заданий, обладающие однородными характеристиками.

Вычислительная задача называется ресурсоемкой, если для ее решения специалисту предметной области не хватает ресурсов доступных ему компьютеров: производительности процессоров, объемов оперативной и дисковой памяти, пропускной способности телекоммуникационной среды. В этом случае число операций, выполняемых вычислительной системой над каждой переменной в соответствии с алгоритмом решения ресурсоемкой задачи, должно, как правило, на несколько порядков превышать быстродействие этих компьютеров.

Процесс решение ресурсоемких вычислительных задач может требовать применения вычислительных систем разного уровня – от относительно простых, имеющих в своем составе типовые вычислительные модули, до специализированных высокопроизводительных серверов и суперкомпьютеров [14]. Ускорение процесса решения ресурсоемких вычислительных задач достигается за счет применения параллельных и распределенных вычислений. Распределенные вычисления – это способ решения задач с использованием нескольких вычислительных устройств. Парадигма параллельных вычислений включает всю совокупность вопросов, относящихся к разработке параллельных алгоритмов решения задачи, организации параллельного использования вычислительных ресурсов для решения задачи и гибкому управлению параллельными процессами решения задачи с целью достижения наибольшей эффективности использования вычислительной системы. Любые вычислительные устройства можно считать параллельной вычислительной

системой, если они работают одновременно и их можно использовать для решения одной задачи. Параллельные или распределенные вычисления являются высокопроизводительными, если существенно ускоряют процесс решения задачи.

При решении задачи в распределенной или параллельной вычислительной системе требуется, во-первых, построить план решения задачи и, во-вторых, распределить ресурсы системы с целью эффективного выполнения процесса решения задачи. Эффективность использования того или иного ресурса для выполнения конкретного задания зависит от степени соответствия ресурса требованиям (вычислительным характеристикам) задания. Когда ресурсы вычислительной системы разнородны, возникает необходимость классификации зданий с целью повышения эффективности процесса распределения ресурсов: если каждому ресурсу поставлены в соответствие определенные классы заданий, то выбор ресурса для выполнения задания конкретного класса существенно упрощается.

Наиболее простым способом классификации объектов является их признаковое описание с использованием числовых и/или нечисловых признаков. В случае классификации заданий в качестве признаков используются вычислительные характеристики заданий.

Вычислительные характеристики заданий

В настоящее время вычислительные кластеры являются неотъемлемым технологическим элементом процесса эффективного решения фундаментальных и прикладных задач. Вычислительные кластеры организуются на базе различных программно-аппаратных платформ, архитектур и коммуникационных сред, и, вследствие этого, существенно отличаются по своим показателям производительности, эффективности и надежности. При объединении нескольких кластеров в единую вычислительную среду (интегрированную кластерную систему), представляющую собой частный случай вычислительной Grid, возникает проблема оптимизации распределения по кластерам потока заданий, поступающих в эту среду.

Формирование и выполнение задания осуществляется с помощью специальных утилит той системы управления ресурсами, которая используется в вычислительной среде. К таким системам относятся: во-первых, глобальные планировщики (метапланировщики) заданий на уровне Grid типа GridWay [15]; во-вторых, локальные системы управления прохождением заданий (СУПЗ) вычислительных кластеров, такие, например, как PBS [16] или Condor [17].

Анализ результатов исследований (таблица 1), затрагивающих в той или иной степени вопросы классификации вычислительных задач и способов их постановки [12, 14, 18, 19], а также рассмотрение способов спецификации процессов решения задач в известных метапланировщиках Grid и кластерных СУПЗ позволяет выявить целый ряд важных характеристик заданий. В их числе: способ решения задачи (использование готовой программы, построение алгоритма решения задачи на основе библиотек стандартных программ,

исполнение программы в режиме интерпретации или компиляции); место размещения (в машине пользователя или в машине системы) программы, используемой для решения задачи; число прогонов программы; наличие взаимосвязанных подзаданий; вид параллелизма алгоритма решения задачи (мелкозернистый, крупноблочный и смешанный параллелизм), степень ресурсоемкости вычислений (малые, средние и большие задания); необходимость управления процессом вычислений в пакетном или интерактивном режимах; срочность вычислений и ряд других особенностей процесса выполнения заданий. Значение той или иной характеристики может быть явно задано пользователем вычислительной среды, формирующим свое задание, получено из переменной окружения этой среды, установлено системой управления заданиями как значение по умолчанию или взято из конфигурационных и статистических файлов (системных или пользовательских).

Таблица 1 – Подходы к классификации вычислительных задач

Подход к классификации заданий	Основы классификации
Классификация задач с точки зрения реализации в алгоритмах их решения тех или иных численных методов (см., например, [18, 19]).	Методы численного дифференцирования и интегрирования, решения систем линейных алгебраических уравнений, решения дифференциальных уравнений в частных производных и др.
Классификация задач по способам решения задач (см., например, [19-24]).	Использование готовой программы; программирование алгоритма решения задачи; построение алгоритма решения задачи на основе библиотек стандартных программ; синтез программ.
Классификация задач по их количественным характеристикам (см., например, [20, 25]).	Малые, средние и большие задачи; задачи вычислительные (мало данных, много вычислений) и задачи обработки данных (много данных, мало вычислений).
Классификация по возможности одновременного выполнения вычислений (см., например, [14]).	Параллельные и последовательные вычисления.
Классификация по степени параллелизма алгоритмов решения задач (см., например, [26]).	Мелкозернистый, крупноблочный и смешанный параллелизм.
Классификация вычислительных заданий (см., например, [27]).	Просты, взаимосвязанные, интерактивные и др. задания.

Вычислительные характеристики потоков заданий, задаются администратором РВС, а сами потоки заданий связываются с приложениями, порождающими эти потоки.

Подходы к классификации вычислительных заданий в системах управления заданиями

Известные на сегодняшний день метапланировщики Grid базируются на двух способах распределения ресурсов [28]: путем взаимодействия метапланировщика с кластерными СУПЗ (например, GridWay) либо за счет реализации планировщика, занимающегося поиском свободных ресурсов в Grid для выполнения конкретного приложения (например, AppLeS [29]). В обоих случаях, как правило, они не производят классификацию заданий на основе характеристик заданий и осуществляют оптимизацию выделения ресурсов, разделяемых между всеми заданиями потока, для выполнения конкретного задания, оперируя информацией, касающейся только этого задания. Такой подход, зачастую, не позволяет добиться высоких показателей функционирования интегрированной кластерной системы в целом: ее пропускной способности, эффективности загрузки ресурсов и времени выполнения некоторого набора задач. Отдельные системы, которые поддерживают классификацию заданий в том или ином виде (например, система управления заданиями программного комплекса gLite [30]), имеют, зачастую, достаточно ограниченный, нерасширяемый набор встроенных типов (классов) заданий и не осуществляют предварительную виртуальную декомпозицию вычислительных ресурсов относительно этих типов с целью оптимизации процесса выбора ресурса для выполнения заданий определенного типа.

Ниже приведены примеры классификации заданий в некоторых используемых на практике системах управления заданиями.

В системе Condor явно выделяются два класса заданий: простые и взаимосвязанные. Задания первого класса запускаются с помощью утилиты *condor_sabmit* Задания второго класса запускаются с помощью утилиты *condor_sabmit_dag*. Дальнейшая классификация осуществляется неявно – путем указания значений различных параметров в паспорте задания.

Программный комплекс gLite разрабатывалась в качестве промежуточного программного обеспечения проекта Enabling Grids for E-sciencE (EGEE) [31], завершенного в 2010 г. В настоящее время развитие и поддержка системы gLite осуществляется в рамках платформы European Middleware Initiative (EMI) [32], используемой для поддержки крупномасштабных научных исследований, например, осуществляемых в рамках проекта Worldwide Large Hadron Collider Computing Grid [33].

Основная и наиболее развитая часть в составе комплекса gLite – это система управления заданиями Workload Management System (WLMS) [30]. Ее назначение – поддержка выполнения программ на распределенных компьютерах, организованных в единую систему. Программный код задания (программа) выполняется на исполнительном компьютере без участия пользователя (в пакетном режиме). Сам код в рядовом случае не требует адаптации к условиям распределенной вычислительной среды. В некоторых случаях может потребоваться его дополнение прологом/эпилогом, которые выполняют подготовительные/завершающие операции, например, доставку

обрабатываемых данных. Задание представляется WLMS в виде формализованного описания, составленного на языке Job Description Language (JDL). Ресурсы распределенной вычислительной среды используются коллективно множеством пользователей, поэтому задание не обязательно начинает выполняться сразу после запуска: оно может ждать освобождения ресурсов, занятых другими заданиями. Ожидающие ресурсов задания хранятся в очередях. WLMS поддерживает работу как с простыми заданиями, так и с составными.

При классификации заданий в WLMS тип задания описывается двумя атрибутами: Type и JobType. Атрибут Type имеет, соответственно, значения «Job» или «DAG». Значение «DAG» (Direct Acyclic Graph of dependent jobs) атрибута Type определяет задание, в котором должны быть выполнены в определенной последовательности ряд простых заданий. Для простого задания применим второй атрибут – JobType, который может принимать следующие значения:

- «Normal» – обыкновенное задание;
- «Interactive» – интерактивное задание;
- «MPICH» – параллельное задание;
- «Checkpointable» – задание с контрольными точками;
- «Partitionable» – сериализуемое (многовариантное) задание.

Перечисленные характеристики могут сочетаться друг с другом, например:

JobType = {«Checkpointable», «MPICH»}.

Более гибкие возможности реализованы в инструментальном комплексе DISCENT [27]. В данном инструментарии для классификации заданий используется структура (a / b / c / d), где символы a, b, c и d имеют следующее назначение:

- a – характеристика алгоритма решения задачи с точки зрения наличия подзадач; фиксированными значениями для a являются 1 (отсутствие подзадач) и K (наличие подзадач);
- b – характеристика алгоритма решения задач с точки зрения наличия в нем параллелизма; фиксированными значениями для b являются L (крупноблочный параллелизм алгоритма), F (мелкозернистый параллелизм алгоритма) и S (последовательный алгоритм); недопустимыми комбинациями значений a и b являются (a = 1 / b = L / …) и (a = K / b = F / …);
- c – характеристика процесса решения задачи с точки зрения необходимости выполнения многовариантных расчетов; фиксированными значениями для c являются 1 (один единственный вариант данных) и N (наличие множества вариантов данных);
- d – характеристика процесса решения задачи с точки зрения места размещения выполняемого программного приложения; фиксированными значениями для d являются G (выполнение

приложения, размещенного в узлах РВС) и R (выполнение удаленного приложения).

Ниже приведены примеры классов заданий, определяемых с помощью этой системы классификации:

- (a = 1 / $b \neq L$ / c / d = R) – стандартные задания (скомпилированные программы пользователей), для выполнения которых используется штатный набор функций СУПЗ;
- (a / b / c = N / d) – многовариантные задания, для решения которых необходимо выполнение программы с различными наборами данных;
- (a / b / c / d = G) – задания, в которых требуется выполнение приложений, размещенных в узлах РВС;
- (a = K / b = L / c / d) – задания, требующие выполнения набора взаимозависимых подзаданий, включенных в процесс решения одной общей задачи.

Модель системы классификации заданий

Пусть имеется конечное множество характеристик заданий $H = \{h_1, h_2, ..., h_k\}$. Каждая характеристика h_i описывается информационной структурой, имеющей следующие компоненты: D_i – область допустимых значений характеристики h_i, включающая символ неопределенности θ; $r_i \geq 1$ – целочисленный ранг характеристики h_i, определяющий степень важности данной характеристики; $w_i \geq 0$ – вес характеристики h_i, представляющий собой численное выражение важности данной характеристики. Будем считать, что элементы множества H частично упорядочены по их рангу по убыванию: $r_i \geq r_{i+1}$, $\forall i \in \{1, 2, ..., k-1\}$.

Определим конечное множество классов заданий $C = \{c_1, c_2, ..., c_m\}$. Каждый класс c_j определяется базовым (обязательным) и дополнительным (необязательным) наборами характеристик из H. Характеристики базового и дополнительного набора для классов заданий удобно представить в виде булевых матриц A и B размерности $k \times m$, элементы которых $a_{ij} = 1$ или $b_{ij} = 1$ означают, что характеристика h_i принадлежит базовому или дополнительному набору, используется в определении класса c_j и для этого класса имеет конкретизированную область допустимых значений $D_{ij}^* \subseteq D_i \setminus \{\theta\}$. Если $a_{ij} \vee b_{ij} = 0$, то $D_{ij}^* \equiv \{\theta\}$. Матрицы A и B должны удовлетворять следующим условиям $\bigvee_{j=1}^{m} \bigwedge_{i=1}^{k} \overline{a_{ij}} = 0$; $\bigvee_{i=1}^{k} \bigvee_{j=1}^{m} (a_{ij} \wedge b_{ij}) = 0$.

Формирование множества характеристик H (определение имен, областей допустимых значений, рангов и весов характеристик) и создание на их основе множества классов заданий C (определение для каждого класса множеств обязательных и необязательных характеристик из множества H с указанием их областей значений, допустимых для конкретного класса) выполняется администратором интегрированной кластерной системы. Как правило,

характеристикам классов заданий, используемым в качестве обязательных характеристик, присваиваются более высокие ранги и веса. При поступлении задания в интегрированную кластерную систему классификатор заданий автоматически проверяет, какие характеристики из множества H использованы в спецификации этого задания, и определяет для каждой из них область значений, требуемую для выполнения задания в его спецификации.

Задание со всеми своими характеристиками представляется булевым вектором x размерности k. Между индексами элементов вектора x и индексами характеристик из H установлено взаимно однозначное соответствие. Значение i-го элемента вектора x определяется следующим образом:

$$x_i = \begin{cases} 0, \textit{если } D'_i \equiv \{\theta\}, \\ 1, \textit{если } D'_i \subseteq D_i \setminus \{\theta\}, \end{cases}$$

где D'_i – это область значений характеристики h_i, требуемых для выполнения данного задания. Вектор x должен удовлетворять условию $\bigwedge_{i=1}^{k} \overline{x_i} = 0$.

Соответствие требуемых областей допустимых значений характеристик задания областям допустимых значений характеристик j-го класса заданий из C устанавливается с помощью характеристической функции

$$\chi_j(x) = \begin{cases} 0, \textit{если } \exists i : (a_{ij} \vee b_{ij} = 1) \wedge (D'_i \not\subseteq D^*_{ij}), \\ 1, \textit{в противном случае}, \end{cases}$$

где $i \in \{1, 2, ..., k\}$, $j \in \{1, 2, ..., m\}$.

Для выполнения первичной классификации задания достаточно применения функции χ. В результате первичной классификации задание может быть соотнесено сразу с несколькими классами заданий из C.

Однако, может возникнуть необходимость в более детальной конкретизации классификации задания, полученной с помощью функции χ. В этом случае следует принимать во внимание число характеристик задания, требуемые области допустимых значений которых удовлетворяют соответствующим областям допустимых значений характеристик того или иного класса, и учитывать ранги и веса этих характеристик.

Ниже введен ряд вспомогательных функций.

Будем говорить, что i-я характеристика используется как в спецификации задания, так и в описании класса c_j, если выполняется условие

$$\overline{x_i} \vee \overline{a_{ij}}\,\overline{b_{ij}} = 0. \qquad (1)$$

Область требуемых значений i-ой характеристики соответствует области допустимых значений этой характеристики для класса c_j, если выполняется условие

$$D'_i \subseteq D^*_{ij}. \qquad (2)$$

Функция $\rho_j(x)$ вычисляет оценку возможности (вероятность) отнесения задания к классу c_j на основе характеристик этого задания, удовлетворяющих

по всем параметрам характеристикам данного класса c_j. Значение функции определяется выражением $\rho_j(x) = \frac{V_j}{S}$, где $V_j = \frac{k_j}{n_j}$, $S = \sum_{l=1}^{m} \frac{k_l}{n_l}$, k_j (k_l) – число характеристик задания, удовлетворяющих условиям (1) и (2) относительно *j*-го (*l*-го) класса, n_j и n_l – число характеристик, определяющих классы c_j и c_l соответственно, $k_j, k_l \in \{0, 1, ..., k\}$, $n_j, n_l \in \{1, ..., m\}$. Нетрудно заметить, что $\rho_j(x) \in [0,1]$ и $\sum_{j=1}^{m} \rho_j(x) = 1$.

Функция $\sigma_j(x)$ вычисляет агрегированный числовой показатель важности характеристик задания для класса c_j с учетом рангов этих характеристик. Значение функции определяется выражением $\sigma_j(x) = n_t s_t + \sum_{l=1}^{t-1} (n_l s_l + k s_{l+1})$, где $s_1, s_2, ..., s_t$ – упорядоченные по убыванию значения рангов, n_t и n_l – число характеристик задания, удовлетворяющих условиям (1) и (2), а также дополнительным условиям $r_i = s_t$ и $r_i = s_l$ соответственно; $\sigma_j(x) \geq 1$.

Функция $\omega_j(x)$ вычисляет сумму весов характеристик задания для класса c_j. Значение функции определяется выражением $\omega_j(x) = \sum_{i \in I} w_i$, где I – это множество индексов характеристик задания, удовлетворяющих условиям (1) и (2); $\omega_j(x) \geq 0$.

Функция $\phi_j(x, z)$ вычисляет оценку возможности (вероятность) отнесения задания к классу c_j с учетом его вычислительной истории z – информационной структуры, содержащей статистику о выполнении в интегрированной кластерной системе заданий с аналогичными характеристиками. Данная информация извлекается из статистических и информационных файлов СУПЗ, применяемых в интегрированной кластерной системе. Значение функции определяется выражением

$$\varphi_j(x, z) = \begin{cases} \frac{1}{m}, & \text{если } \forall l \in \{1, 2, ..., m\}\ \gamma_l(x, z) = 0, \\ \frac{\gamma_j(x, z)}{\sum_{l=1}^{m} \gamma_l(x, z)}, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $\gamma_l(x, z)$ и $\gamma_j(x, z)$ – функции, возвращающие число выполненных в интегрированной кластерной системе заданий классов c_l и c_j с аналогичными характеристиками. Нетрудно заметить, что $\phi_j(x, z) \in [0,1]$ и $\sum_{j=1}^{m} \phi_j(x, z) = 1$.

Определим также верхние границы эквивалентности значений функций ρ, σ, ω и ϕ – δ_ρ, δ_σ, δ_ω и δ_ϕ соответственно. Два значения одной и той же

функции будем считать эквивалентными, если модуль их разницы будет меньше соответствующей верхней границы эквивалентности, либо равен ей.

Пусть с помощью функции χ сформирован булев вектор y размерности m, элемент которого $y_j = 1$ означает, что задание относится к j-му классу. Введем следующие характеристические функции, конкретизирующие принадлежность задания j-му классу с учетом перечисленной выше дополнительной информации о характеристиках задания:

$$\chi_j^{\rho}(x,y) = \begin{cases} 0, \textit{если } \max\limits_{\forall l: y_l = 1}\{\rho_l(x)\} - \rho_j(x) > \delta_{\rho}, \\ 1, \textit{в противном случае}, \end{cases}$$

$$\chi_j^{\sigma}(x,y) = \begin{cases} 0, \textit{если } \max\limits_{\forall l: y_l = 1}\{\sigma_l(x)\} - \sigma_j(x) > \delta_{\sigma}, \\ 1, \textit{в противном случае}, \end{cases}$$

$$\chi_j^{\omega}(x,y) = \begin{cases} 0, \textit{если } \max\limits_{\forall l: y_l = 1}\{\omega_l(x)\} - \omega_j(x) > \delta_{\omega}, \\ 1, \textit{в противном случае}, \end{cases}$$

$$\chi_j^{\varphi}(x,y,z) = \begin{cases} 0, \textit{если } \max\limits_{\forall l: y_l = 1}\{\varphi_l(x,z)\} - \varphi_j(x,z) > \delta_{\varphi}, \\ 1, \textit{в противном случае}. \end{cases}$$

Следует заметить, что наличие у задания отдельно взятой характеристики с высокой значимостью (как обязательной, так и необязательной) не гарантирует отнесение этого задания к классу, в описании которого присутствует данная характеристика. Классификация осуществляется с учетом агрегированной значимости всех характеристик задания для каждого класса заданий.

Алгоритм классификации задания

Рассмотрим алгоритм классификации задания. На вход алгоритму поступает вектор x, представляющий задание. На выходе получаем вектор y, содержащий информацию о классах, к которым относится данное задание. Алгоритм включает следующие этапы работы:

I. Инициализация элементов вектора y: $y_j = 0$, $\forall j \in \{1, 2, ..., m\}$.

II. Выполнение первичной классификации задания – проверка принадлежности задания каждому из m классов: $y_j = \chi_j(x)$, $\forall j \in \{1, 2, ..., m\}$.

III. Если $y_j = 0$, $\forall j \in \{1,2,...,m\}$, то завершение работы алгоритма (задание не может быть классифицировано).

IV. Иначе – выполнение конкретизации результатов классификации задания, полученной на этапе II.

а) Редукция множества классов, к которым относится задание, с учетом числа характеристик классов: $y_j = \chi_j^{\rho}(x,y)$, $\forall j: y_j = 1$.

б) Редукция множества классов, к которым относится задание, с учетом рангов характеристик $y_j = \chi_j^{\sigma}(x,y)$, $\forall j: y_j = 1$.

в) Редукция множества классов задания, к которым относится

задание, с учетом весов характеристик $y_j = \chi_j^{\omega}(x, y)$, $\forall j : y_j = 1$.

г) Редукция множества классов задания, к которым относится задание, с учетом вычислительной истории данного задания $y_j = \chi_j^{\phi}(x, y, z)$, $\forall j : y_j = 1$.

V. Завершение работы алгоритма (задание классифицировано).

Модель системы классификации потоков заданий

Модель системы классификации потоков заданий строится аналогично модели системы классификации заданий. Пусть имеется конечное множество характеристик потоков заданий $\tilde{H} = \{\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \ldots, \tilde{h}_k\}$. Каждая характеристика $\tilde{h}_i$ описывается информационной структурой, имеющей следующие компоненты: $\tilde{D}_i$ – область допустимых значений характеристики $\tilde{h}_i$, включающая символ неопределенности θ.

Определим конечное множество классов потоков заданий $\tilde{C} = \{\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \ldots, \tilde{c}_m\}$. Каждый класс $\tilde{c}_j$ определяется набором обязательных характеристик из $\tilde{H}$. Характеристики классов потоков заданий удобно представить в виде булевой матрицы $\tilde{A}$ размерности $k \times m$, элемент которой $\tilde{a}_{ij} = 1$ означает, что характеристика $\tilde{h}_i$ используется в определении класса $\tilde{c}_j$ и для этого класса имеет конкретизированную область допустимых значений $\tilde{D}_{ij}^* \subseteq \tilde{D}_i \setminus \{\theta\}$. Матрица $\tilde{A}$ должна удовлетворять следующим условиям:

$$\bigvee_{j=1}^{m} \bigwedge_{i=1}^{k} \overline{\tilde{a}_{ij}} = 0, \tag{3}$$

$$\bigvee_{j=1}^{m} \bigvee_{l=1}^{m} \bigwedge_{i=1}^{k} \overline{(\tilde{a}_{ij} + \tilde{a}_{il})} = 0, \tag{4}$$

где $(\tilde{a}_{ij} + \tilde{a}_{il})$ – сложение $\tilde{a}_{ij}$ и $\tilde{a}_{il}$ по mod(2), $j \neq l$.

Формирование множества характеристик $\tilde{H}$ (определение имен, областей допустимых значений, рангов и весов характеристик) и создание на их основе множества классов потоков заданий $\tilde{C}$ (определение для каждого класса характеристик из множества $\tilde{H}$ с указанием их областей значений, допустимых для конкретного класса) выполняется администратором интегрированной кластерной системы.

Поток заданий со всеми своими характеристиками представляется булевым вектором $\tilde{x}$ размерности k. Между индексами элементов вектора $\tilde{x}$ и индексами характеристик из $\tilde{H}$ установлено взаимно однозначное соответствие. Значение i-го элемента вектора $\tilde{x}$ определяется следующим образом:

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} 0, \text{если } \tilde{D}'_i \equiv \{\theta\}, \\ 1, \text{если } \tilde{D}'_i \subseteq \tilde{D}_i \setminus \{\theta\}, \end{cases}$$

где $\tilde{D}'_i$ – это область значений характеристики $\tilde{h}_i$. Вектор $\tilde{x}$ должен удовлетворять условию $\bigwedge_{i=1}^{k} \overline{\tilde{x}_i} = 0$.

Соответствие требуемых областей допустимых значений характеристик потока заданий областям допустимых значений характеристик j-го класса потоков заданий из $\tilde{C}$ устанавливается с помощью характеристической функции

$$\tilde{\chi}_j(\tilde{x}) = \begin{cases} 0, \textit{если } \exists i : (\tilde{a}_{ij} = 1) \wedge (\tilde{D}'_i \not\subseteq \tilde{D}^*_{ij}), \\ 1, \textit{в противном случае}, \end{cases}$$

где $i \in \{1,2,\ldots,k\}$, $j \in \{1,2,\ldots,m\}$.

Исходя из условий (3) и (4) в результате применения функции $\tilde{\chi}_j$ к каждому j-му классу поток заданий будет либо взаимно однозначно соотнесен с одним из классов потоков заданий из $\tilde{C}$, либо не определен.

Алгоритм классификации потока заданий

Рассмотрим алгоритм классификации потока заданий. На вход алгоритму поступает вектор $\tilde{x}$, представляющий поток заданий. На выходе получаем вектор $\tilde{y}$, содержащий информацию о классах, к одному из которых относится данный поток заданий. Алгоритм включает следующие этапы работы:

I. Инициализация элементов вектора $\tilde{y}$: $\tilde{y}_j = 0$, $\forall j \in \{1,2,\ldots,m\}$.

II. Выполнение классификации потока заданий – проверка принадлежности потока задания каждому из m классов: $\tilde{y}_j = \tilde{\chi}_j(\tilde{x})$, $\forall j \in \{1,2,\ldots,m\}$.

III. Если $\tilde{y}_j = 0$, $\forall j \in \{1,2,\ldots,m\}$, то завершение работы алгоритма (поток заданий не может быть классифицирован). Иначе – $\exists \tilde{y}_j = 1$, $j \in \{1,2,\ldots,m\}$, завершение работы алгоритма (задание классифицировано).

Вычислительные эксперименты

На основе приведенных выше теоретических исследований автором диссертационной работы выполнена программная реализация имитационного прототипа классификатора заданий с использованием языков программирования GPSS и PLUS [34]. Имитационное моделирование работы классификатора заданий было проведено на потоке заданий, соответствующем потоку реальных заданий, выполненных на кластере Blackford с СУПЗ Cleo (таблица 2). В таблице 2 для каждого кластера указано общее число его узлов n_n и ядер n_c, а также усредненный коэффициент увеличения времени выполнения заданий k_{run}.

Таблица 2 – Вычислительные ресурсы РВС

Кластер	n_n	n_c	k_{run}
	единиц		
Blackford	20	160	1
МВС-1000/16	16	32	3
Кластер невыделенных рабочих машин, организованный на базе ПЭВМ научных лабораторий	12	12	2

Всего было обработано 62249 заданий. Список использованных классов задач приведен в таблице 3. Для каждого класса заданий приведены диапазоны допустимых значений ряда его базовых характеристик: число вариантов данных n_v, число требуемых ядер n_c, запрашиваемое время для выполнения задания t.

Таблица 3 – Классы заданий в интегрированной кластерной системе

Класс заданий	Характеристика		
	n_v	n_c	t, мин
	единиц		
univariant sequential small	1	1	1 – 5
univariant sequential medium	1	1	5 – 60
univariant sequential large	1	1	> 60
univariant parallel small	1	≥ 2	1 – 5
univariant parallel medium	1	≥ 2	5 – 60
univariant parallel large	1	≥ 2	> 60

Перед классификацией каждому кластеру (таблица 2) были назначены наиболее подходящие ему классы заданий. Все задания были классифицированы. Для части заданий выявлена потенциальная возможность их перемещения с кластера Blackford на другие кластера с целью оптимизации загрузки вычислительных ресурсов. Перемещение задания возможно только на кластер, удовлетворяющий характеристикам класса задания, и при условии, что время выполнения перемещенного задания останется в диапазоне времени выполнения заданий данного класса. Для заданий классов *univariant sequential large* и *univariant parallel large* учитывалось дополнительное ограничение: перемещенное задание не должно выполняться дольше суток. Число классифицированных заданий n_{job} и число перемещенных заданий n_r для каждого класса приведены в таблице 4.

Полученные результаты показали, что дополнительное применение классификатора заданий в процессе распределения заданий совместно с метапланировщиком заданий интегрированной кластерной системы позволило бы повысить коэффициент полезного использования узлов системы на 18%.

Таблица 4 – Результаты классификации заданий

Класс заданий	n_{job}	n_r
univariant sequential small	10221	4675
univariant sequential medium	7927	5861
univariant sequential large	1211	972
univariant parallel small	33453	492
univariant parallel medium	6125	50
univariant parallel large	3312	95

Реализован действующий прототип классификатора заданий для интегрированной кластерной системы ИДСТУ СО РАН. Схема взаимодействия компонентов классификатора заданий представлена на рис. 1.

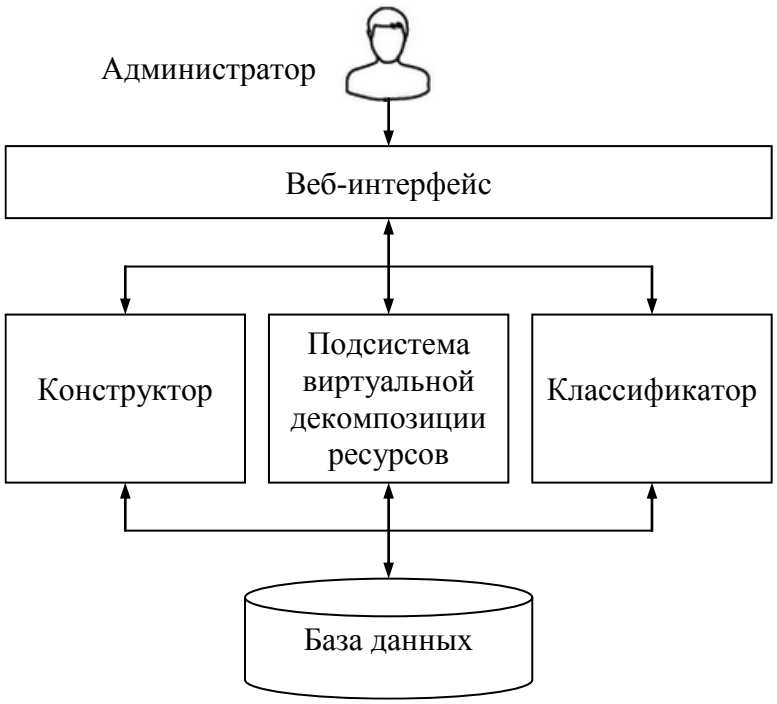


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов классификатора заданий

Подсистема виртуальной декомпозиции ресурсов используется администратором РВС для выделения определенных классам заданий наиболее подходящих для их выполнения вычислительных узлов. На основе такого распределения все задания, относящиеся к конкретному классу, могут быть выполнены только на специально выделенных ресурсах интегрированной кластерной системы. Конструктор обеспечивает возможность создания элементов классификации (характеристик, классов и т.д.) и их занесения в базу данных классификатора заданий. Классификатор обеспечивает проведение классификации задания и определение его принадлежности потоку заданий конкретного приложения. Классы потоков заданий заранее задаются администратором интегрированной кластерной системы. Взаимодействие пользователя с классификатором заданий осуществляется с помощью веб-

интерфейса. Все данные (характеристики заданий, классы и т.д.), необходимые в процессе классификации заданий, хранятся в базе данных классификатора заданий.

Классификатор заданий разработан в дополнение к инструментальным средствам [35] имитационного моделирования процессов функционирования разнородных РВС, в том числе для исследования и оптимизации мультиагентных систем управления распределенными вычислениями [36].

Дополнительно разработаны средства конкретизации заданий для более детальной настройки требований к РВС, содержащихся в заданиях, с целью обеспечения более эффективного планирования и распределения ресурсов планировщиками СУПЗ при обработке этих заданий. Схема взаимодействия данных средств между собой и с СУПЗ представлена на рис. 2.

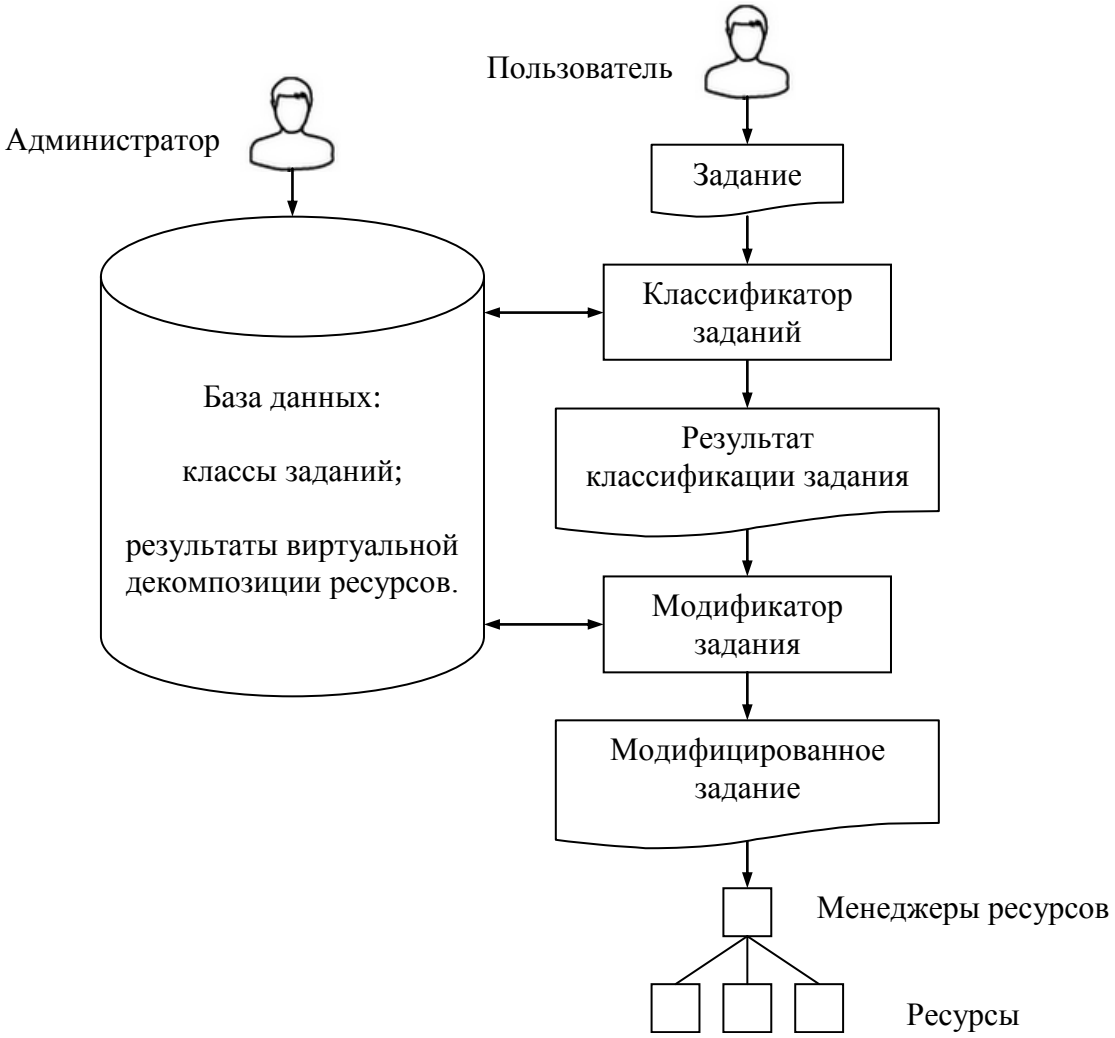


Рис. 2. Схема конкретизации задания

Конкретизатор заданий осуществляет перехват заданий, поступающих в РВС. Конкретизатор передает перехваченное задание классификатору, который выполняет унификацию задания и определение дополнительных его характеристик, извлекаемых из переменных окружения вычислительной среды, конфигурационных параметров СУПЗ или статистических файлов. Затем

классификатор определяет класс задания и передает исходное задание и результат его классификации модификатору задания.

Модификатор задания добавляет в задание дополнительные параметры, определяющие множество ресурсов, соответствующих классу задания, и передает модифицированное задание в СУПЗ. В дальнейшем планировщик СУПЗ будет выбирать ресурсы для выполнения задания только из множества ресурсов, заданного дополнительными параметрами модифицированного задания. Таким образом, конкретизатор заданий может быть использован для управления распределением ресурсов на основе классификации и конкретизации потоков заданий масштабируемых приложений.

С целью более полного исследования рассмотренных выше методов и инструментальных средств классификации и конкретизации потоков заданий масштабируемых приложений проведено имитационное моделирование функционирования РВС с помощью системы GPSS World [34]. Моделируемая система включала 10 кластеров с числом ядер от 6000 до 14000 единиц и 300 пользователей. Общее число ядер составляло 100000 единиц. Кластеры включали гибридные узлы, поддерживающие различные технологии параллельного программирования. При имитации времени выполнения задания на кластерах применялись коэффициенты ускорения счета, значения которых для разных кластеров варьировались от 1 до 1,5 в зависимости от вычислительных характеристик этих кластеров. Моделируемый период времени работы системы – 30 суток. За этот период было обработано 12990 потоков заданий. Эти потоки включали от 1000 до 10000 процессов для параллельных программ или заданий для многовариантных расчетов. В качестве системы управления вычислениями в РВС использовались метапланировщик GridWay. Дисциплина обслуживания очередей заданий – FCFS (First Come, First Served) с приоритетами. В качестве основных наблюдаемых переменных имитационной модели были выбраны следующие показатели: среднее число n_{avg} заданий в очереди кластера, среднее время t_{avg} пребывания задания в очереди кластера и средний коэффициент k_{avg} полезного использования узлов кластеров, среднеквадратическое отклонение σ коэффициент полезного использования узлов кластеров, среднее число рестартов программ n_{rest} и среднее число сбойных задач n_{err}. Приведенные в таблице 5 результаты моделирования показывают, что применение конкретизатора может существенно улучшить все выбранные показатели функционирования РВС.

Результаты модельных экспериментов подтверждены результатами практического использования конкретизатора заданий при решении в РВС ряда крупномасштабных задач булева моделирования [37-40] и складской логистики [41, 42].

Таблица 5 – Результаты использования конкретизатора заданий

Распределение ресурсов	Показатель эффективности системы управления вычислениями					
	n_{avg}, единиц	t_{avg}, с	k_{avg}, %	σ	n_{rest}, единиц	n_{err}, единиц
Без применения конкретизатора заданий	572.398	771.820	0.710	0.006	135	34
С применением конкретизатора заданий	196.142	372.283	0.756	0.004	97	2

Выводы

Представленный подход к классификации заданий позволяет расширить функциональные возможности метапланировщика РВС и осуществлять оптимизацию распределения вычислительных ресурсов среды не только на уровне отдельно взятого задания, но также на уровне потока заданий. Следует отметить, что аналоги реализованным средствам классификации заданий в используемых на практике СУПЗ для вычислительных кластеров авторам неизвестны.

Автор выражают благодарность за помощь в программной реализации классификатора заданий кандидату технических наук Корсукову А.С.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-29-07955-офи_м.

Литература

1. Коваленко В. Н., Корягин Д. А. Грид: истоки, принципы и перспективы развития // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 4. С. 38-50.

2. Advancements in Distributed Computing and Internet Technologies: Trends and Issues / Eds. A.-S.K. Pathan, M. Pathan, H.Y. Lee. IGI Global, 2011. 430 p.

3. Бухановский А. В. Информационно-аналитический обзор по критической технологии «Технологии и программное обеспечение высокопроизводительных распределенных вычислительных систем: технологические тренды, приоритетные направления, перспективы развития, основные организации, оценка рынков, сопоставление российских и мировых результатов». СПб.: НИУ ИТМО. 2013. 31 с.

4. Шамакина А. В. Обзор технологий распределенных вычислений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. Т. 3. № 3. С. 51-85.

5. Бетелин В. Б., Кушниренко А. Г., Райко Г. О. Проблемы обеспечения роста производительности отечественных суперЭВМ в период до 2020 года // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 9. С. 15-18.

6. Эксафлопные технологии. Концепция по развитию технологии

высокопроизводительных вычислений на базе суперЭВМ эксафлопсного класса (2012-2020 гг.). М.: Росатом, 2011. 112 с.

7. Dongarra J., Bosilca G., Herault T., Rezmerita A. On Scalability for MPI Runtime System // CLUSTER '11. Washington, 2011. Pp. 187-195.

8. Menasce D. A., Casalicchio E. QoS in grid computing // IEEE Internet Computing. 2004. Vol. 8. No. 4. Pp. 85-87.

9. Chunlin L., Layuan L. A distributed multiple dimensional QoS constrained resource scheduling optimization policy in computational grid // Journal of Computer and System Sciences. 2006. Vol. 72. No. 4. Pp. 706-726.

10. Perez-Gonzalez P., Framiñan J. A Common Framework and Taxonomy for Multicriteria Scheduling Problems with Interfering and Competing Jobs: Multi-agent Scheduling Problems // European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 235. No. 1. Pp. 1-16.

11. Muthuvelu N., Chai I., Chikkannan E., Buyya R. QoS-based Task Group Deployment on Grid by Learning the Performance Data // Journal of Grid Computing. 2014. Vol. 12. No. 3. Pp. 465-483.

12. Иванов В. В. Методы вычислений на ЭВМ: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1986. 584 с.

13. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. М.: Мир. 1991. 568 с.

14. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

15. Herrera J., Huedo E., Montero R., Llorente I. Porting of Scientific Applications to Grid Computing on GridWay // Scientific Programming. 2005. Vol. 13. No. 4. Pp. 317–331.

16. Henderson R. Job scheduling under the portable batch system // Job scheduling strategies for parallel processing. Springer. 1995. Pp. 279-294.

17. Litzkow M., Livny M., Mutka M. Condor – A Hunter of Idle Workstations // In 8th International Conference of Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE CS Press, Los Alamitos, CA, USA, 1988. Pp. 104-111.

18. Бахвалов Н. С. Численные методы. М.: Наука, 1973. Т. 1. 632 с.

19. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики – М.: Наука, 1980. 536 с.

20. Человек и вычислительная техника / Под ред. В.М. Глушкова. Киев: Наукова думка, 1971. 294 с.

21. Козлов Н. И. Организация вычислительных работ. М.: Наука, 1981. 240 с.

22. Ершов А. П., Ильин В. П. Пакеты программ как методология решения прикладных задач // Пакеты прикладных программ: Проблемы и перспективы. 1982. С. 4-18.

23. Тыугу Э. Х. Концептуальное программирование. М.: Наука, 1984. 256 с.

24. Опарин Г. А. Автоматизация разработки и применения пакетов программ для исследования динамики сложных управляемых систем. Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.13.11. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 1998. 40 с.

25. Voevodin V. V. The solution of large problems in distributed computational media // Automation and Remote Control. 2007. Vol. 68. No. 5. Pp. 773-786.

26. Bandman O. L. Fine-graned parallelism in computational mathematics // Programming and computer software. 2001. No. 1. Pp. 170-182.

27. Бычков И. В., Корсуков А. С., Опарин Г. А., Феоктистов А. Г. Инструментальный комплекс для организации гетерогенных распределенных вычислительных сред // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 1. С. 45-54.

28. Топорков В. В. Модели распределенных вычислений. М.: Физматлит, 2004. 320 с.

29. Berman F., Wolski R., Casanova H., Cirne W., Dail H., Faerman M., Figueira S., Hayes J., Obertelli G., Schopf J., Shao G., Smallen S., Spring N., Su A., Zagorodnov D. Adaptive Computing on the Grid Using AppLeS // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2003. Vol. 14. No. 4. Pp. 369–382.

30. Коваленко В. Н. Комплексное программное обеспечение грида вычислительного типа // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2007. № 10. 39 с.

31. European Middleware Initiative [Электронный ресурс]. URL: http://www.eu-emi.eu/ (дата обращения: 12.10.2015).

32. Enabling Grids for E-sciencE [Электронный ресурс]. URL: http://eu-egee-org.web.cern.ch/eu-egee-org/index.html (дата обращения: 12.10.2015).

33. Worldwide LHC Computing Grid [Электронный ресурс]. URL: http://wlcg.web.cern.ch/ (дата обращения: 12.10.2015).

34. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.

35. Дядькин Ю.А. Инструментальное средство моделирования разнородной распределенной вычислительной среды // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: http://www.science-education.ru/122-21388 (дата обращения: 21.08.2015).

36. Костромин Р. О. Модели, методы и средства управления вычислениями в интегрированной кластерной системе // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-1. С. 35-38.

37. Опарин Г. А., Богданова В. Г. РЕБУС – интеллектуальный решатель комбинаторных задач в булевых ограничениях // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2008. Т. 6. Вып. 1. С. 61-69.

38. Опарин Г. А., Богданова В. Г., Макеева Н. Г. Инструментальная среда параллельного решения систем булевых уравнений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3. С. 62-68.

39. Богданова В. Г., Горский С. А. Технология параллельного решения систем булевых уравнений на вычислительном кластере // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 54-60.

40. Богданова В. Г., Горский С. А., Пашинин А. А. Сервис-ориентированные инструментальные средства для решения задач булевой

выполнимости // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-6. С. 1151-1156.

41. Горский С. А., Башарина О. Ю. Моделирование складской логистики: разработка и комплексирование в Orlando Tools // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 89-91.

42. Башарина О. Ю., Носков С. И. Решение задач складской логистики на основе применения методологии системного анализа // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1. С. 70-75.

References

1. Kovalenko V. N., Koryagin D.A. Д.А. Grid: istoki, printsipy I perspektivy razvitiya [Grid: Sources, Principles and Development Prospects]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy*, 2008, no. 4, pp. 38-50 (in Russian).

2. Pathan A.-S.K., Pathan M., Lee H.Y. *Advancements in Distributed Computing and Internet Technologies: Trends and Issues*. IGI Global, 2011. 430 p.

3. Bukhanovskij A. V. *Informatsionno-analiticheskij obzor po kriticheskoj tekhnologii "Tekhnologii I programnoe obespechenie vysokoproizvoditel'nykh raspredelennykh vychislitel'nykh sistem: tekhnologicheskie trendy, prioritetnye napravleniya, perspektivy razvitiya, osnovnye organizatsii, otsenka rynkov, sopostavlenie rossijskikh I mirovykh rezultatov"* [Information-Analytical Review of the Critical Technology "Technologies and Software High-Performance Distributed Computing Systems: Technological Trends, Priorities, Prospects, Key Organizations, Markets Evaluation, Comparison of Russian and International Results"]. Saint-Petersburg, ITMO National Research University Publ., 2013, 31 p. (in Russian).

4. Shamakina A. V. Survay on Distributed Computing Tecnologies. *Bulletin of the South Ural State University, Series "Computational Mathematics and Software Engineering"*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 51-85 (in Russian).

5. Betelin V. B., Kushnirenko A. G., Rajko G .O. Problemy obespecheniya rosta proizvoditel'nosti otechestvennykh superEVM v period do 2020 goda [Problems of Productivity Growth for Domestic Supercomputers in the Period up to 2020]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy*, 2010, no. 9, pp. 15-18 (in Russian).

6. *Eksaflopsnye tekhnologii. Kontseptsiya po razvitiyu tekhnologii vysokoproizvoditel'nykh vychislenij na baze superEVM eksaflopcnogo klassa (2012-2020 gg.)* [Exascale Technology. The Concept for the Development of High-Performance Computing Technology Based on Exascale Supercomputers (2012-2020)]. Moscow, Rosatom Publ., 2011. 112 p. (in Russian).

7. Dongarra J., Bosilca G., Herault T., Rezmerita A. On Scalability for MPI Runtime System. *Proc. of the IEEE International Conference on Cluster Computing*, Austin, 2011, pp. 187-195.

8. Menasce D. A., Casalicchio E. QoS in Grid Computing. *IEEE Internet Computing*, 2004, vol. 8, no. 4, pp. 85-87.

9. Chunlin L., Layuan L. A Distributed Multiple Dimensional QoS Constrained Resource Scheduling Optimization Policy in Computational Grid. *Journal of Computer and System Sciences*, 2006, vol. 72, no. 4, pp. 706-726.

10. Perez-Gonzalez P., Framiñan J. A Common Framework and Taxonomy for

Multicriteria Scheduling Problems with Interfering and Competing Jobs: Multi-agent Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 235, no. 1, pp. 1-16.

11. Muthuvelu N., Chai I., Chikkannan E., Buyya R. QoS-based Task Group Deployment on Grid by Learning the Performance Data. *Journal of Grid Computing*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 465-483.

12. Ivanov V. V. *Metody vychislenij na EVM: spavochnoe posobie* [Methods of Computer Calculations: A Reference Guide]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 584 p. (in Russian).

13. Lauriere J.-L. *Intelligence Artificielle. Resolusion de problemes par l'Homme et la machine*. Paris, Eyrolles, 1987, 485 p. (in Franch).

14. Voevodin V. V., Voevodin Vl.V. *Parallel'nye vychisleniya* [Parallel Computing]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2002, 608 p. (in Russian).

15. Herrera J., Huedo E., Montero R., Llorente I. Porting of Scientific Applications to Grid Computing on GridWay. *Scientific Programming*, 2005, vol. 13, no. 4, pp. 317–331.

16. Henderson R. Job Scheduling under the Portable Batch System. *Proc. of the IPPS Workshop Job Scheduling Strategies for Parallel Processing.* Springer, Santa Barbara, 1995, pp. 279-294.

17. Litzkow M., Livny M., Mutka M. Condor – A Hunter of Idle Workstations. *In Proc. of 8th International Conference of Distributed Computing Systems (ICDCS)*, IEEE CS Press, Los Alamitos, 1988, pp. 104-111.

18. Bakhvalov N. S. *Chislennye metody* [Computational Methods]. Moscow, Nauka Publ., 1973, vol. 1, 632 p. (in Russian).

19. Marchuk G. I. *Metody vychislitel'noj matematiki* [Methods of Computational Mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 536 p. (in Russian).

20. *Chelovek I vychislitel'naya tekhnika* [Human and Computer Engineering]. Ed. V.M. Glushkov. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971, 294 p. (in Russian).

21. Kozlov N. I. *Organizatsiya vychislitel'nykh rabot* [Computing Works Organization]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 240 p. (in Russian).

22. Ershov A. P., Ilyin V. P. *Pakety program kak metodologiya resheniya prikladnykh zadach* [Software packages as methodology for solving applied problems]. *Pakety prikladnykh program: Problemy I perspektivy* [Applied Software Packages: Problems and Prospects], 1982, pp. 4-18 (in Russian).

23. Tyugu E. *Kontseptual'noe programmirovanie* [Conceptual Programming]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 256 p. (in Russian).

24. Oparin G. A. *Avtomatizatsiya razrabotki I primeneniya paketov programm dlya issledovaniya dinamiki slozhnykh upravlyaemykh system*. Dis. dokt. tehn. nauk [Automating the Development and Application of Software Packages for the Study of Dynamics of Complex Control Systems. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Irkutsk, ISDCT SB RAS Publ., 1998, 40 p. (in Russian).

25. Voevodin V. V. The Solution of Large Problems in Distributed Computational Media. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, no. 5, pp. 773-786.

26. Bandman O. L. Fine-Graned Parallelism in Computational Mathematics.

Programming and Computer Software, 2001, no. 1, pp. 170-182.

27. Bychkov I. V., Korsukov A. S., Oparin G. A., Feoktistov A. G. Instrumental'nyj kompleks dlya organizatsii geterogennykh raspredelennykh vychislitel'nykh sred Инструментальный комплекс для организации гетерогенных распределенных вычислительных сред [The Toolkit for Development of Heterogeneous Distributed Computing Environments]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitrl'nye sistemy*, 2010, no. 1, pp. 45-54 (in Russian).

28. Toporkov V. V. *Modeli raspredelennykh vychislenij* [Models of Distributed Computing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 320 p. (in Russian).

29. Berman F., Wolski R., Casanova H., Cirne W., Dail H., Faerman M., Figueira S., Hayes J., Obertelli G., Schopf J., Shao G., Smallen S., Spring N., Su A., Zagorodnov D. Adaptive Computing on the Grid Using AppLeS. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2003, vol. 14, no. 4, pp. 369-382.

30. Kovalenko V. N. *Kompleksnoe programmnoe obespechenie grida vychislitel'nogo tipa* [Complex Software for Grid Computing]. Moscow, Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 2007, no. 10, 39 p. (in Russian).

31. *European Middleware Initiative.* Available at: http://www.eu-emi.eu/ (accessed 12 October 2015).

32. *Enabling Grids for E-sciencE.* Available at: http://eu-egee-org.web.cern.ch/eu-egee-org/index.html (accessed 12 October 2015).

33. *Worldwide LHC Computing Grid.* Available at: http://wlcg.web.cern.ch/ (accessed 12 October 2015).

34. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumentalnyie sredstva GPSS World* [Modeling Systems. Tools of the GPSS World]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2004, 368 p. (in Russian).

35. Dyadkin Y. A. The Toolkit for Modeling of Heterogeneous Distributed Computing Environments. *Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 2. Available at: URL: http://www.science-education.ru/122-21388 (accessed 11 October 2015) (in Russian).

36. Kostromin R.O. Models, Methods and Means Calculations Control in Integrated Cluster System. *Fundamental Research*, 2015, no. 6-1, pp. 35-38 (in Russian).

37. Oparin G. A., Bogdanova V. G. REBUS – Intellctual Solver for Combinatorial Problems in Boolean Constraints. *Vestnik Novosibirsk State University, Series "Information Technologies"*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 61-69 (in Russian).

38. Oparin G. A., Bogdanova V. G., Makeeva N. G. Toolkit for the Parallel Solving of Systems Boolean Equations. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2009, no. 3, pp. 62-68 (in Russian).

39. Bogdanova V. G., Gorsky S. A. The Technology of Parallel Solution of Nonlinear Systems of Boolean Equations on a Computer Cluster. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2013, no. 1, pp. 54-60 (in Russian).

40. Bogdanova V. G., Gorsky S. A., Pashinin A. A. Service-Oriented Tools for Solving of Boolean Satisfiability Problem. *Fundamental Research*, 2015, no. 2-6,

pp. 1151-1156 (in Russian).

41. Gorsky S. A., Basharina O. Y. Modeling of Warehousing: Development and Integration in Orlando Tools. *Programmnye produkty i sistemy*, 2012, no. 1, pp. 89-91 (in Russian).

42. Basharina O. Y., Noskov S. I. Solving of Warehouse Logistic Tasks on Basis Methodology System Analysis. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2014, no. 1, pp. 70-75 (in Russian).

Статья поступила 27 октября 2015 г.

Информация об авторе

Феоктистов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент. Старший научный сотрудник лаборатории параллельных и распределенных вычислительных систем. Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. Область научных интересов: организация проблемно-ориентированных распределенных вычислений; имитационное моделирование; мультиагентные технологии. E-mail: agf65@yandex.ru

Адрес: Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134.

The Methodology of Conceptualizing and Classifying Job Flows of the Scalable Applications in a Heterogeneous Distributed Computing Environment

A. G. Feoktistov

Purpose. *Modern distributed computing environments are characterized by the high competition of users for shared resources of these environments during performing of the users' jobs. The problem of the optimal allocation of resources for jobs actualizes the solving tasks of identifying, describing, classifying and using of the information about characteristics of resources and jobs. Currently, the traditional resource management systems for distributed computing environments are unable to effectively solving the problems listed above. The purpose of the present paper is the development of the methodology of conceptualizing and classifying job flows of scalable applications in distributed computing environments. This methodology, firstly, includes the specialized models and methods of representing and using of knowledge about resources and jobs, and, secondly, provides the technology to the practical usage of these models and methods.* ***Methods.*** *Attributive description of classified objects using numerical and non-numerical characteristics are used in a process of classifying of jobs and their flows. In the case of classifying jobs, computational characteristics of these jobs are used as attributes, in the job flows classification – structural and behavioral characteristics of these flows. A recognition of properties for jobs and their flows is performed by means a set of specialized characteristic functions. The detailed setting requirements contained in the classified jobs is carried out on the basis of program specialization methods.* ***Novelty.*** *As is known to the author, analogs of the means for classifying jobs and their flows suggested in the paper are not used by resource management systems for distributed computing environments in practice.* ***Results.*** *The usage of the means for classifying jobs and their flows suggested in the paper as superstructure to a resource management system allows significantly improve the results of the allocation of these resources.* ***Practical relevance.*** *The simulation results show that the usage of the developed systems for classifying jobs and their flows allows to optimize resources allocation and provides a significant increase of some important parameters of the efficiency for functioning distributed computing environment. The practical usage of these systems confirms the received model results.*

Key words: *distributed computing environment, scalable applications, job flows, conceptualizing and classifying.*

Information about Author

Aleksandr Gennadyevich Feoktistov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Senior Research Officer of the Laboratory of Parallel and Distributed Computing Systems. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS. Field of research: organization of problem-oriented distributed computing, simulation modeling; multiagent technologies. E-mail: agf65@yandex.ru

Address: Russia, 664033, Irkutsk, Lermontov St., 134.

УДК 004.7

Оценка роли инфокоммуникаций в национальной экономике и выявление закономерностей их развития

Кузовкова Т. А.

Постановка задачи: *кардинальные преобразования, конвергенция сетей, услуг, систем и технологий в области связи и информатики, затрагивающие смежные рынки и национальную экономику диктуют необходимость научного обоснования трансформации нового сектора экономики, закономерностей его развития во взаимосвязи с национальной экономикой, причин и факторов формирования отрасли инфокоммуникаций.* ***Целью работы*** *является выявление закономерностей развития инфокоммуникаций как комплексной отрасли экономики и ее значения, корреляционной взаимосвязи с экономическим ростом, этапов научно-технического прогресса, конвергенции связи и информатики и их последствий, действия информационно-экономического закона, закономерностей потребления и макрогенерации инфокоммуникационных услуг с целью формирования методического аппарата прогнозирования развития инфокоммуникаций.* ***Используемые методы:*** *в работе нашли применение экономико-математические и статистические методы.* ***Результат.*** *Обоснование факторов и закономерностей развития инфокоммуникаций позволяет более объективно и с учетом множества факторов прогнозировать ее перспективы во взаимосвязи с национальной экономикой.* ***Практическая значимость*** *работы состоит в научном обосновании параметров прогнозирования развития инфокоммуникаций и использования их результатов для развития экономики страны.*

Ключевые слова: *инфокоммуникации, научно-технический прогресс, конвергенция, закономерности.*

Введение

Значение отрасли инфокоммуникаций состоит в том, что она является инфраструктурным компонентом не только экономической и социальной жизни общества, но и процесса информатизации. Во второй половине XX века в ходе научно-технического прогресса (НТП) наметился переход от индустриальной эпохи развития мировой цивилизации к информационной. Процесс информатизации характеризуется охватом всех секторов экономики, слоев общества, аспектов производственной деятельности и социальной жизни людей; проникновением информационных технологий в производство, управление, бизнес, образование, медицину, культуру и отдых; превращением информации в важнейший фактор производства.

В развитии материально-технической базы отрасли инфокоммуникаций важную роль играет НТП, который, качественно изменяя элементы производства, материализуясь в новых видах энергии, технологий, в новых материалах и ресурсах, воздействуя на систему потребностей общества, меняет функциональную структуру производства и конечного продукта. Научно-технический прогресс и конвергентные процессы развития инфокоммуникаций оказывают кардинальное и принципиальное влияние на структуру экономики и социума, формируя информационное общество информационального характера, т.е. меняющего это общество изнутри. В связи с этим возникает необходимость выявления закономерностей и факторов развития инфокоммуникаций, взаимосвязи ее развития с экономическим ростом,

действия информационно-экономического закона, закономерностей потребления и макрогенерации инфокоммуникационных услуг, позволяющих обосновать аналитико-прогнозный аппарат исследования развития инфокоммуникаций и его использования для прогнозирования развития экономики нашей страны.

Место отрасли инфокоммуникаций в национальной экономике и взаимосвязь их развития

Значение отрасли инфокоммуникаций в национальной экономике не ограничивается ее ролью как важнейшего компонента производственной и социальной инфраструктуры, без которой невозможны нормальные производственные и социальные процессы. Конвергенция связи и информатики обеспечивают новый виток технологического развития всех секторов национальной экономики и социальной жизни и ведут к прогрессивным изменениям в сфере экономической деятельности и социума. За последние 25 лет инфокоммуникации приобрели роль системообразующего фактора в формировании информационного общества в национальном и мировом масштабах и обеспечении устойчивых темпов [1]. Значение отрасли инфокоммуникаций определяется, в первую очередь, положительными результатами применения инфокоммуникационных технологий и сетей в производстве товаров и услуг, во-вторых – качественным изменением производительных сил и факторов производства.

Место любой отрасли в национальной экономике характеризуется системой показателей, среди которых важное значение имеет показатель значимости экономической деятельности в формировании валового внутреннего продукта (ВВП) России, определяемый долей продукции (доходов) какого-либо сектора экономики в ВВП. В сложных условиях развития мировой экономики немаловажное значение имеет показатель инновационного характера, отражающий потенциал развития страны или сектора экономики.

Для оценки влияния инновационного характера развития на экономические результаты в сфере инфокоммуникаций можно использовать показатель доли доходов, получаемых от новых услуг, в общих доходах отрасли:

$$d_{Д инн.р} = \frac{Д_{нов.усл}}{Д_{отр}} = \frac{Д_{нов.усл}}{Д_{трад.усл} + Д_{нов.усл}}; \qquad (1)$$

где $Д_{нов.усл}$ - доходы инфокоммуникаций от новых услуг (подвижной и документальной связи, в частности, телематических служб, передачи данных, широкополосного доступа к сети Интернет), цифрового телерадиовещания, сектора информационных технологий); $Д_{тр.усл}$ - доходы инфокоммуникаций от традиционных услуг; $Д_{отр}$ - общие доходы отрасли инфокоммуникаций.

По данным Всемирного банка и Международного союза электросвязи (МСЭ) доля инфокоммуникационного сектора в валовом мировом продукте (ВМП) достигла в 2012 году 8,3% [2-4]. Доля доходов отрасли

инфокоммуникаций в ВВП России с 2001 года снизилась и составит в 2015 году (оценка) 38% (рис. 1). При этом доля новых услуг (подвижной и документальной связи, цифрового телерадиовещания и информационных технологий) в общем объеме доходов инфокоммуникаций постоянно повышается – с 59,2% в 2001 г. до 76,5% в 2015 г. (оценка).

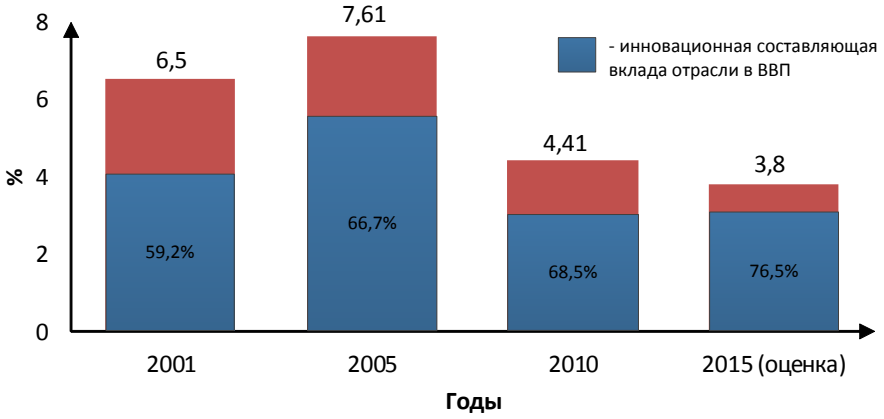


Рис. 1. Изменение вклада инфокоммуникаций в экономический рост (ВВП) Российской Федерации за 2001-2015 годы с учетом инновационной составляющей (%)

Сопоставление темпов прироста физического объема ВВП и услуг инфокоммуникаций за период 2001-2013 гг. в условиях нивелирования ценового фактора (с учетом индекса-дефлятора ВВП и индекса потребительских цен) указывает на опережающий характер темпов развития инфокоммуникаций по сравнению с макроэкономикой страны (рис. 2) [5].

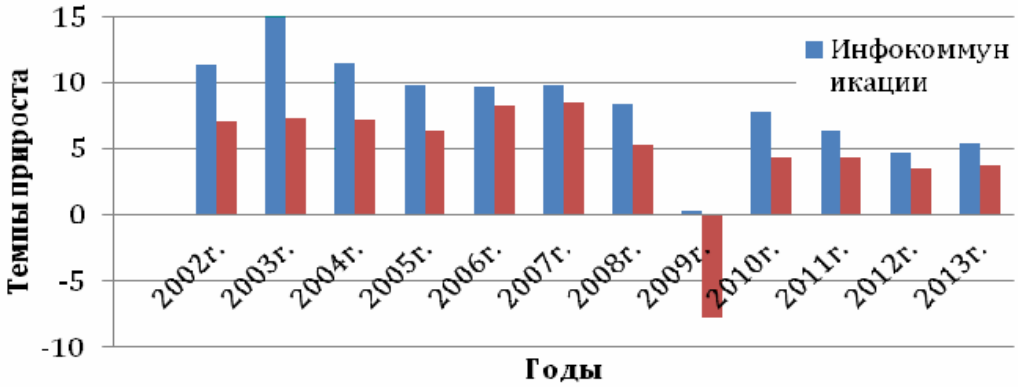


Рис. 2. Темпы прироста (снижения) физического объема ВВП и услуг инфокоммуникаций за 2002 – 2013 годы (%)

Рынок инфокоммуникационных услуг является одним из наиболее динамично развивающихся рынков не только во всём мире, но и в России (рис. 3). По данным Минкомсвязи России за последние 13 лет объем рынка инфокоммуникационных услуг в России вырос почти в 7,8 раз (в том числе: рынка услуг связи – в 10 раз, информационных технологий – в 8,2 раза, печати и массовых коммуникаций - в 3,8 раза), претерпев небольшой этап падения в

2008-2009 гг., который был вызван мировым финансовым кризисом, сокращением долгосрочных инвестиций в развитие отрасли и спроса на услуги со стороны предприятий и организаций национальной экономики.

Для оценки эффективности отраслевой деятельности в стоимостном выражении используются следующие показатели: доходы от услуг компонентов отрасли: связи, информационных технологий, печати и массовых коммуникаций, объем капитальных вложений в развитие отрасли. Для оценки емкости рынка и доступности услуг и средств инфокоммуникаций используются относительные показатели интенсивности потребления услуг и перспективности используемых технологий в натуральном выражении: плотность пользователей средств связи и информационных сетей и технологий, плотность терминалов на 100 чел. населения, душевой уровень доходов от инфокоммуникационных услуг, доля применения передовых технологий (цифровых систем передачи телефонных сообщений, цифрового телевидения и радиовещания).

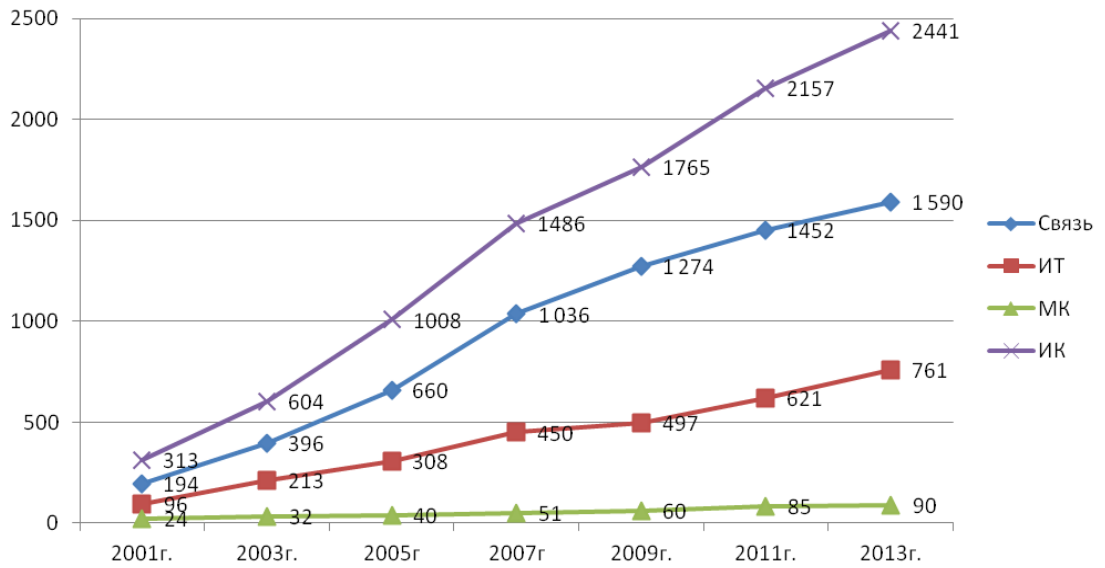


Рис. 3. Динамика доходов отрасли инфокоммуникаций (ИК), секторов связи, информационных технологий (ИТ), печати и массовых коммуникаций (МК) России за 2001-2013 годы, млрд. руб. (на основе отчета о производственной деятельности Минкомсвязи России за 2001-2013 гг.)

О развитии отраслевого рынка свидетельствуют показатели доступности услуг и технологического уровня инфокоммуникаций (табл. 1), которые за последние 13 лет имеют весьма положительную динамику и кардинальный рост, особенно в части доступности пользователей сети Интернет – в 16,4 раз и компьютеров – в 7,7 раз; интенсивности использования приложений и сети подвижной связи – плотность сим-карт выросла в 33,6 раз; роста уровня цифровых первичных сетей связи общего пользования – на 12,6% и достижении 100% уровня цифровизации, местной телефонной связи – на 61,7%, телерадиовещания – на 81%. Уровень охвата населения цифровым телерадиовещанием в 2013 году достиг 82,8%.

Таблица 1 – Индикаторы развития отрасли инфокоммуникаций*

Показатели	Единица измерения	2001 г.	2013 г.	Темп изменения за период,%
1 Капитальные вложения	млрд. руб.	54,3	351,3	647,0
2. Телефонная плотность	ТА на 100 чел.	24,1	29,5	119,9
3. Плотность терминалов подвижной связи	ТПС на 100 чел.	5,6	188,4	3364,3
4. Плотность персональных компьютеров	ПК на 100 чел.	7,6	58,6	771,1
5. Плотность пользователей сети Интернет	ПИ на 100 чел.	2,9	47,7	1644,8
6. Уровень цифровых систем - местной телефонной сети - первичной сети - телерадиовещания	 % % %	 36,2 87,4 0	 87,9 100,0 81,0	 + 61,7 + 12,6 + 81,0
7. Доходы инфокоммуникаций в том числе от услуг: - связи - информационных технологий - печати и массовых коммуникаций	млрд. руб. млрд. руб. млрд. руб. млрд. руб.	313,4 194,2 95,6 23,6	2441,4 1589,6 851,8 89,5	779,0 818,5 797,4 379,2
8. Охват населения цифровым телерадиовещанием	%	0	82,8	+82,8
9. Доля доходов отрасли инфокоммуникаций в ВВП	%	6,5	4,24	-2,26
10. Доходы инфокоммуникаций на 1 чел. (расходы 1 пользователя)	тыс. руб. на 1 чел.	2,0	18,4	920,0

*Отчеты о производственной деятельности Минкомсвязи России за 2001-2013 гг.

Характер инвестирования развития отрасли показывает, что финансовые средства на развитие сетей и средств инфокоммуникаций выросли в 6,5 раз. В результате инновационного развития отрасли инфокоммуникаций, обеспечения насыщения рынка услугами фиксированной и подвижной телефонной связи, и снижения тарифов ее вклад в валовой внутренний продукт несколько уменьшился (в условиях сырьевой модели экономики), при этом расходы пользователей за анализируемый период увеличились в 9,2 раз. Происходящие изменения в сфере производства и реализации инфокоммуникационных услуг напрямую сказываются на сфере потребления средств и услуг инфокоммуникаций, характеризуемой ростом у пользователей терминалов доступа к инфокоммуникационным сетям и информационным ресурсам, в том числе широкополосного доступа, и их расходов на инфокоммуникации.

Анализ основных параметров развития инфокоммуникаций в России показывает, что инновационная политика, направленная на формирование национальной инфокоммуникационной инфраструктуры информационного общества, расширение использования ИКТ и информационных ресурсов в

экономике, управлении и социуме, повышение качества и спектра прогрессивных инфокоммуникационных услуг, обеспечивает динамичное и поступательное функционирование отрасли.

Исследование взаимосвязи развития инфокоммуникаций и макроэкономических показателей может проводиться как по абсолютным экономическим показателям, так и относительным темпам их динамики. Статистические данные Росстата показывают, что абсолютные стоимостные показатели ВВП, инвестиций, фонда заработной платы работников и доходов инфокоммуникаций (в действующих ценах) в современных условиях российской экономики имеют четкую тенденцию к росту (табл. 2).

Таблица 2 – Изменение темпов прироста макроэкономических показателей Российской Федерации (в действующих ценах) за период 2001– 2013 годы

Годы	Валовой внутренний продукт	Численность занятых в экономике	Инвестиции в основной капитал	Фонд заработной платы	Доходы инфоком-муникаций
2001	-	-	-	-	-
2002	19,9	1,1	37,9	18,3	26,8
2003	29,0	0,6	24,1	25,5	51,9
2004	28,9	0,6	31,1	21,5	31,5
2005	26,9	1,1	26,0	25,5	27,0
2006	24,5	0,6	31,0	24,0	18,7
2007	23,5	1,2	42,0	30,1	24,2
2008	24,1	0,1	30,8	28,3	18,4
2009	-6,0	-1,6	-9,2	3,6	0,3
2010	16,4	0,1	14,7	10,7	13,0
2011	20,8	0,3	17,8	12,4	8,2
2012	11,0	0,9	13,5	11,8	3,3
2013	8,6	-0,3	14,9	11,5	9,5
Темпы роста за период, %	770,9	105,2	1099,7	743,4	779,0

Так рост ВВП за 13 лет в 7,7 раза сопровождался ростом инвестиций в основной капитал – в 11 раз, фонда оплаты труда работников – в 7,4 раза, доходов от услуг и средств инфокоммуникаций – в 7,8 раз. Следует отметить положительную тенденцию занятых в экономике, численность которых за период увеличилась на 5,2% при уменьшении численности российского населения на 0,2% по сравнению с 2001 годом.

Для выявления взаимосвязи между макроэкономическим развитием (ВВП), развитием инфокоммуникаций и динамикой других важнейших показателей произведем анализ тесноты связи между ними не по абсолютным показателям, а по относительным показателям. Недостаток стоимостных показателей состоит в значительном влиянии на динамику ценового фактора, отражающего инфляцию, изменение паритета валют, цен на товары и тарифов на услуги.

В [6, с. 141-143] показано, что матрица линейных коэффициентов парной корреляции абсолютных макроэкономических показателей демонстрирует

значительную тесноту связи факторов с результативным показателем ВВП, обусловленную наличием одинаковой тенденции к росту, т.е. автокорреляцией. Поэтому уравнение регрессии зависимости ВВП от факторов, выраженных в абсолютных значениях, имеет значительную ошибку аппроксимации при весьма скромных величинах коэффициентов множественной корреляции и множественной детерминации.

С целью исключения автокорреляции исходных динамических рядов вследствие ценового фактора уравнение регрессии ВВП от влияющих факторов целесообразно строить на основе цепных темпов прироста изучаемых показателей в процентах. Матрица линейных коэффициентов парной корреляции между темпами прироста ВВП и влияющих на его изменение факторов приведена в табл. .

Таблица 3 – Матрица линейных коэффициентов парной корреляции между темпами прироста ВВП и влияющих на его изменение факторов

Темпы прироста показателей	x_1	x_2	x_3	x_4	y
x_1 – темп прироста численности занятых в экономике	1,00	0,040	0,006	0,057	0,133
x_2 – темп прироста инвестиций в основной капитал	0,040	1,00	0,915	0,567	0,854
x_3 – темп прироста фонда заработной платы	0,006	0,915	1,00	0,607	0,744
x_4 – темп прироста доходов инфокоммуникаций	0,057	0,567	0,607	1,00	0,589
y – темп прироста ВВП	0,133	0,854	0,735	0,589	1,00

Анализ взаимосвязей в темпах прироста ВВП и влияющих факторов указал на значимость прироста инвестиций в основной капитал (линейный коэффициент корреляции равен 0,854), фонда заработной платы занятых в экономике (0,735) и развития инфокоммуникаций (0,589), и незначительную связь прироста ВВП и прироста численности занятых в экономике (0,133).

Уравнение регрессии зависимости темпа прироста ВВП от темпов прироста влияющих факторов имеет вид

$$\Delta I_y = 2,07 + 1,2 \cdot \Delta I_{x_1} + 0,306 \cdot \Delta I_{x_2} + 0,205 \cdot \Delta I_{x_3} + 0,183 \cdot \Delta I_{x_4}, \quad (2)$$

где ΔI_y – выровненное значение темпа прироста ВВП (%); ΔI_{x_1} – темп прироста занятых в экономике (%); ΔI_{x_2} – темп прироста инвестиций в основной капитал (%); ΔI_{x_3} – темп прироста средней зарплаты работников (%); ΔI_{x_4} – темп прироста доходов инфокоммуникаций (%).

Коэффициент множественной корреляции R=0,87, коэффициент множественной детерминации R^2=0,757, ошибка аппроксимации при уровне значимости α=0,01 равна 5,36%, что говорит о достаточно высокой степени достоверности модели. Бета-коэффициенты по факторам равны: x_1=0,11; x_2=0,98; x_3=0,24; x_4=0,47. В данной модели сила влияния факторов на результативный показатель имеет аналогичные приоритеты, при этом повысилось и стало положительным влияние x_3. Это свидетельствует, во-первых, о комплексном влиянии инновационных составляющих на развитие

национальной экономики, во-вторых, о значении роста доходов и благосостояния занятых в экономики для прироста ВВП; в-третьих, об значении развития инфокоммуникаций для экономического роста.

Для оценки влияния развития инфокоммуникаций на ВВП по данным об изменении объема ВВП и доходов инфокоммуникаций за период 2001–2013 гг. (в сопоставимых условиях) построено уравнение регрессии зависимости прироста физического объема ВВП от прироста объемов инфокоммуникационных услуг:

$$\Delta I_{ВВП} = 3,085 + 0,035\Delta I_{ИК}. \quad (3)$$

Из модели следует, что прирост объема услуг отрасли инфокоммуникаций на 1% ведет к приросту ВВП на 0,035%.

С учетом последствий финансового кризиса 2009 года, воздействия внешних факторов и насыщения рынка услугами фиксированной и подвижной связи была произведена оценка влияния развития инфокоммуникаций на прирост ВВП по фактическим и прогнозным данным 2010-2015 годов и получено следующее уравнение регрессии зависимости прироста физического объема ВВП от прироста объемов инфокоммуникационных услуг:

$$\Delta I_{ВВП} = 3,02 + 0,055\Delta I_{ИК}, \quad (4)$$

что свидетельствует о повышении роли развития инфокоммуникаций в экономическом росте национальной экономики при сокращении доли сырьевых факторов.

Этапы научно-технического прогресса в развитии связи и информатики

Нынешний этап информационной революции не просто событие в истории науки и техники. Концепция информационного общества приобретает все более реальное воплощение, неумолимо продвигая цивилизацию по новому этапу своего развития. Научно-технический прогресс (НТП), качественно изменяя элементы производства, материализуясь в новых видах энергии, технологий, в новых материалах и ресурсах, воздействуя на систему потребностей общества, меняет функциональную структуру производства и конечного продукта. Воздействие НТП на функциональную структуру производства проявляется, прежде всего, в изменении состава и качества как традиционных элементов - орудия и предметы труда, трудовые ресурсы, так и усилении роли информационных ресурсов.

В последние десятилетия научно-технический прогресс по характеру превратился в научно-технологический, состоящий не только во внедрении в производство результатов научных исследований и новой техники, которое осуществлялось в индустриальном обществе, а в том, что само производство должно быть приспособленным к постоянной, систематически осуществляемой модернизации, реализации новых технологий и технологическому перевооружению.

Перспективы быстрого и повсеместного распространения информационных технологий непосредственно связаны с развитием сетей и

технологий связи, при этом НТП играет важную роль в развитии материально-технической базы отрасли инфокоммуникаций. Кроме того, информатизация общества, государственного аппарата законодательной и исполнительной власти, управления производством товаров и услуг, вызывает постоянный рост объема информации и требований к скорости ее передачи [1, 7, 8].

ИКТ меняют жизнь людей, культуру общества, производственно-экономические отношения, стиль работы. В этом смысле речь идет о превращении знания в научную технологию. Инфокоммуникационные технологии - это предельно широкое явление, несводимое к классической технологии как совокупности средств, процессов, операций, методов. Современное общество, отдаленное от технологии, и технология, сепарированная от общества - не жизнеспособны [3, 9]. Кроме того, научно-технологический прогресс, информатизация управления производством, экономическими и социальными процессами вызывают постоянный рост объема информации и повышение требований к скорости ее передачи и обработки [10].

Инфокоммуникации - весьма наукоемкая отрасль. Все достижения в области микроэлектроники, вычислительной техники, космических исследований, технологий материалов, лазерной техники и др. немедленно применяются для создания новых и совершенствования действующих технических и вычислительных средств, сетей связи, способствовали появлению новых систем связи информационных технологий и обеспечивали более полное удовлетворение потребностей различных потребителей инфокоммуникационных услуг [11].

Закономерности развития отраслей и секторов экономики обусловлены процессом постоянного совершенствования техники и технологии производства, которые в свою очередь являются следствием разрешений во времени противоречия между формой развития продукта (услуг) и их содержанием. Для определения закономерностей НТП в области инфокоммуникаций используем критерий, предлагаемый В.И. Яковцом: «При исследовании закономерностей смены поколений техники необходимо выделять принципиально новые поколения, формирующие научно-техническое направление..., выражающее содержание революционного переворота в данной области техники» [12, с.22].

Исследовать закономерности развития инфокоммуникаций можно по характеру развития НТП, который служит исходной базой перемен в формах организации производства и управления, системе производственных отношений, образе жизни человека и человеческого общества. Прогресс техники и технологии в инфокоммуникациях состоит в дифференциации и специализации технологии обработки и хранения, техники передачи и приема информации, качественном их преобразовании на основе создания принципиально нового поколения техники для удовлетворения потребностей в услугах и устранения противоречия между ее формой и содержанием [6].

Для выявления закономерностей развития связи, информатики и инфокоммуникаций на основе НТП выделяются периоды времени, для которых

характерно появление принципиально новых услуг и новых поколений техники связи и информатики, определяющих очередной качественно новый этап в развитии инфокоммуникаций (табл. 4).

Таблица 4 – Характерные этапы развития связи, информатики и инфокоммуникаций

Этапы	Период времени	Технические средства связи	Линии и сети связи	Интеграция с ЭВМ
первый	1830-1890 гг.	телеграф, телетайп, телефон	кабельная линия телеграфной связи	--
второй	1890-1925 гг.	радио, каналообразующая аппаратура	телефонные линии связи, в 1 телефонном канале используется 18 телеграфных	--
третий	1925-1955 гг.	телевидение, радиовещательная станция, абонентский телеграф	радиорелейная линия	--
четвертый	1955-1975 гг.	полуэлектронный коммутатор с частотным разделением каналов и программмным управлением, цифровой способ передачи, видеотелефон, электронная почта, радиотелефон	оптические линии, спутниковые системы связи, трансатлантический кабель, интегрированные цифровые сети	интеграция микроэлектроник и ЭВМ и средств связи
пятый	1975-1990 гг.	электронный коммутатор с временным разделением и цифровым управлением, фотонный коммутатор, «почта голосом», подвижная электросвязь	радиотелефонная связь, новое поколение спутниковых систем	слияние ЭВМ и средств связи
шестой	1990-2010 гг.	мультимедиа, спутниковая подвижная связь	цифровые сети, волоконно-оптические и спутниковые линии, сети интегрального обслуживания, интеллектуальные сети	взаимодействие информационных и телекоммуникационных сетей, систем, технологий
седьмой	2010 – 2030 гг.	электронный преобразователь речи, использование ионосферы для передачи информации, нанотехнологии и биочипы ПЭВМ	цифровая широкополосная связь, мобильный Интернет, цифровое телевидение, глобальная сеть	Инфокоммуникации

Начало каждого этапа НТП может быть рассмотрено через разрешение противоречия между функциями действующей техники, технологии и новой их структурой, способствующего приведению формы предоставляемых услуг в соответствие их новому содержанию [6].

Начало *первого этапа* в развитии связи, создании новой области человеческой деятельности - электросвязи, нужно отнести к 30-м годам IXX века, ко времени создания русским изобретателем принципиально нового технического устройства для передачи и приема информации –

электромагнитного телеграфа. Это вызвало в передовых странах США, Великобритании, Франции, Германии, России создание первых линий телеграфных связей. Изобретение развивалось бурно и уже в 1866 г. компания Western Union имела в США 4000 телеграфных отделений, и была завершена прокладка первого трансатлантического кабеля для связи между Европой и Америкой. Телеграф достиг совершенства в начале XX века, когда на смену морзянке пришел гораздо удобный цифровой код Боде - так появился телетайп.

Начало *второго этапа НТП* в связи можно отнести к 1890 г. С этого года по 1925 г. было создано принципиально новое поколение техники связи радио, в общей модели связи появился новый дополнительный элемент – каналообразующая аппаратура связи, позволившая в одном телефонном канале использовать 18 телеграфных каналов. В эти же годы появилось новое достижение, позволившее для передачи телефонных разговоров использовать телефонные линии связи, ранее телефонная информация передавалась по телеграфным линиям связи. Создание нового вида услуги связи по праву может рассматриваться как важнейший этап в истории развития человечества. С середины 20-х годов до середины 50-х годов нашего столетия появилась принципиально новая техника связи и новый вид услуги связи - телевидение.

На третьем этапе была создана радиовещательная станция, радиорелейная линия связи, получил свое развитие такой новый вид услуг связи, как абонентский телеграф, позволивший в диалоговом режиме осуществить между пользователями документальную связь. Из всех научно-технических событий третьего этапа НТП наиболее важным стало создание и развитие телевидения, которое внесло принципиальные изменения в жизнь всего человечества.

Для четвертого этапа НТП, который развернулся через несколько лет после второй мировой войны (1955–1975 гг.), наиболее характерным является использование: полуэлектронного коммутатора с частотным разделением каналов и программным управлением. Это принципиально новая техника связи, которая появилась вследствие интеграции микроэлектроники, ЭВМ и средств электросвязи, цифрового способа передачи информации на основе кодово-импульсной модуляции в линиях связи. За счет преобразования аналогово-речевых сигналов в цифровые обеспечивается высокая устойчивость сигналов. С помощью цифрового передающего оборудования стало возможным использовать преобразование речевого сигнала в цифровой на входе и выходе местных коммутационных станций. Поскольку процессы передачи и коммутации интегрированы с помощью одних и тех же цифровых систем с временным разделением, то такая система получила название интегрированной цифровой сети (ИЦС). Использование преобразователей в аппаратуре связи, находящейся у потребителя, позволяет ему получать различные услуги связи. На сети связи появились такие новые услуги связи как факсимильная связь, видеотелефон, телетекст, телефакс, видеотекс, электронная почта, радиотелефонная связь. К особенностям этого этапа можно отнести также применение трансатлантического кабеля и использование оптических линий связи, создание спутниковых систем - качественно нового способа передачи

информации. Наиболее характерные результаты НТП в связи имеют опять таки общечеловеческое социальное значение.

Пятый этап НТП (1975–1990 гг.) связан с применением электронных коммутаторов с временным разделением, функционирующих только в цифровом режиме, с цифровым управлением, появлением поколения фотонных коммутаторов, нового поколения спутников связи, новых услуг связи, таких как “почта голосом”, которая представляет из себя систему записи информации, хранящейся в компьютеризированной форме, которая с помощью систем связи может быть затребована или направлена различным потребителям. Для пятого этапа НТП характерно слияние ЭВМ и средств систем связи. Особенностью пятого этапа является создание нового поколения спутников связи, что привело к качественному изменению их пропускной способности.

Шестой этап (1990–2005 гг.) связан с бурным развитием мобильной связи, в том числе спутниковой, цифровизацией сетей связи, применением методов асинхронной передачи (ATM), пакетной коммуникации Frame Relay, которые способствовали развитию мультимедийного обслуживания пользователей в стационарном и мобильном режимах, развитию интегральных форм обслуживания (ISDN), интеллектуальных сетей. Этот этап характеризуется тесным взаимодействием информационных и телекоммуникационных сетей и технологий.

На седьмом этапе начато использование таких выдающихся открытий, как: устройство преобразования речи, позволяющее по каналам связи общаться людям друг с другом на разных языках; создание связи с помощью заранее подготовленных участков ионосферы; дальневидение и телепатия на основе применения устройств, развивающих и усиливающих способности человека; нейтрино-элементарные частицы колоссальной проникающей способности, для которых “прозрачна” практически вся Вселенная. Это обеспечивает возможность создания глобальной системы связи без использования ретрансляционных устройств независимо от среды прохождения сообщения. Связь на пучках нейтрино может стать одним из надежных средств межпланетной космической связи. Новые способы передачи и обработки информации позволят привести в соответствие психологические, физиологические особенности человека с возможностями техники связи.

Рассматривая последовательность смены этапов НТП, которые отражают закономерность развития не только связи, но и инфокоммуникаций необходимо отметить, что начало каждого нового этапа НТП вызревает в предыдущем, поэтому хронологическое разделение в определенной мере всегда является условным, хотя в целом отражает закономерность научно-технического развития связи и ее конвергенции с информатикой, по которой можно проследить влияние связи и инфокоммуникаций на развитие человеческого общества.

Представленные в табл. 4. характерные черты развития связи и инфокоммуникаций демонстрируют очередные ступени реализации уже освоенных технологий (технологических принципов) путем совершенствования способов приема, обработки, накопления и передачи информации, коммутации

сообщений, средств связи и каналообразующей аппаратуры [6]. Каждый этап развития связи сопровождался появлением новых видов телекоммуникационных и инфокоммуникационных услуг, конвергенцией систем, сетей, технологий связи и информатики.

Этапы, которые прошла в своем развитии связь с начала девятнадцатого столетия, во времени непрерывно сокращаются: если продолжительность первого этапа составляла 60 лет, то последующих соответственно – 35, 30, 25, 15 лет. Прогрессивность смены этапов НТП в сфере информатики меняется еще более высокими темпами. По закону Мура производительность персональных компьютеров (число операций в секунду увеличивается в 10 раз каждое пятилетие [1].

Информационные технологии развивались параллельно и взаимоувязано с развитием возможностей каналов связи (от аналоговых к высокоскоростным цифровым каналам) и всеобщей компьютеризацией общества [1, 10, 13]. Сети передачи информации совершили колоссальный скачок за столетие: от телеграфных и телефонных сетей к интегральным цифровым сетям передачи всех видов информации (речь, данные, видео).

Наиболее впечатляющие успехи развития инфокоммуникационных технологий наблюдаются в последние 20 лет, в которых можно выделить следующие периоды перехода на новые технологии и сети:

- от телеграфных и телефонных сетей (от докомпьютерной эпохи) к передаче данных между отдельными абонентами по выделенным и коммутируемым каналам с использованием модемов и построению сетей передачи данных с коммутацией пакетов: дейтаграммных или использующих виртуальные соединения (типа X.25);
- от локальных вычислительных сетей (наиболее распространенные - Ethernet, Token Ring) к международной сети Интернет и цифровым сетям интегрального обслуживания (ISDN) – сначала узкополосным, а затем широкополосным;
- от высокоскоростных распределенных сетей (Frame Relay, SMDS, ATM) к высокоскоростным локальным сетям (Fast Ethernet, FDDI, FDDI II - развитие FDDI для синхронной передачи речевой и видео информации) и информационным супермагистралям;
- от глобальных сетей NGN (Next Generation Network) к мультисервисным сетям IMS (IP Multimedia Subsystem), беспроводному широкополосному доступу, IPTV и глобальной информационной инфраструктуре.

Важным достижением являются распределенные сети на оптоволокне. Использование оптоволокна позволяет обеспечить практически неограниченные скорости передачи информации, высокое качество и обеспечивать доступ пользователей к сетям передачи данных из любой точки, в том числе и во время движения. В последние годы наиболее распространенными являются технологии, использующие стандарты AMPS, GSM (3G, 4G, 5G), и метод CDMA - кодового разделения частотного канала на

основе документа IS-95, позволяющий более полно и рационально использовать радиочастотный спектр канала.

Существенный рост потребления пакетной информации потребовал изменения технологий подвижной связи в направлении увеличения объемов и скорости передачи информации. Вследствие этого появились стандарты 4G, 5G и технология LTE-Advanced (LTE-A), заметно меняющие облик инфокоммуникаций, предоставляя пользователям широкополосные каналы передачи данных с высокой скоростью и емкостью. Высокие скорости передачи данных (выше 1 Гбит/с) достигаются использованием режима многоканального приема-передачи (MIMO), схемы модуляции с ортогональным мультиплексированием (OFDM), сплошной широкой полосы радиочастотного спектра и передачи голосовой информации только поверх пакетной сети (VoIP).

Разработка новых методов асинхронной передачи разнородной информации, механизмов мультиплексирования и управления потоками, создание распределенных сетей на оптоволокне, использование объединенных сегментов радиочастотного спектра для передачи радиосигналов обеспечивают неограниченную скорость передачи информации, широкополосный доступ к сетям передачи данных из любой точки мира и во время движения, высокий потенциал по интеграции и повышению эффективности глобальной и национальных сетей, включая сеть Интернет, снижение стоимости инфокоммуникационных услуг и преодоление цифрового неравенства на всей территории нашей страны.

Наглядным примером проявления НТП в инфокоммуникациях является сеть Интернет, которая получила широкое распространение в мире бизнеса, науки, образования с середины 80-годов XX века, став одним из наиболее распространенных сетевых приложений. Интернет не имеет какого-либо единого административного органа, управляющего всей его инфраструктурой. Существует только ряд достаточно авторитетных образований (называемых комитетами), действующих на общественных началах и вырабатывающих общие рекомендации по принципам функционирования сети.

Сеть Интернет представляет собой глобальную (транснациональную) инфокоммуникационную инфраструктуру, объединяющую множество независимых компьютерных сетей, соединенных между собой для обмена информацией по стандартным открытым протоколам и обеспечивающих передачу данных в различных физических средах: телефонных кабелях, оптоволокне, радио и спутниковых каналах. Доступ к сети Интернет осуществляется различными способами: модемное подключение через коммутируемую телефонную линию, цифровые сети интегрального обслуживания (ISDN), цифровую абонентскую линию (технология xDSL), кабельные линии и беспроводную радио и спутниковую связь.

Резкое увеличение числа пользователей Интернет в последнее время во многом связано с созданием языка для описания гипертекстовых документов HTML (HiperText Markup Language). Язык HTML позволяет создавать документы гибкой структуры, объединяющие текстовую, табличную, графическую и звуковую информацию. За счет расширенной структуры адреса

в ссылках HTML появилась возможность размещать страницы одного документа на различных серверах сети Интернет. Именно механизм гипертекстовых ссылок позволил объединить отдельные серверы Интернет во «всемирную паутину» - World Wide Web (WWW).

Необходимость эффективно работать во все более расширяющемся информационном пространстве Интернета потребовала создания специальных программных средств для навигации в этом своеобразном информационном океане. Такие программы, получившие название “браузеров”, сегодня должны быть установлены на каждом компьютере, подключенном к всемирной паутине WWW. С их помощью пользователь осуществляет доступ к серверам WWW, получение на свою рабочую станцию выбранных HTML-документов, их просмотр, редактирование, печать.

Архитектура и принципы организации инфокоммуникационной инфраструктуры современной экономики определяются специфическими признаками развития ИКТ. ***Дальнейшая эволюция инфокоммуникаций будет осуществляться в направлениях:***

- увеличения скорости передачи информации, обусловленное возрастающими возможностями широкополосных линий и оптических каналов;
- интеллектуализации сетей передачи информации;
- удешевления и миниатюризации оконечных средств;
- развития технологий и стандартов беспроводной связи, освоения более высоких частот радиочастотного ресурса;
- виртуализации хранилищ и обработки данных,
- удаленного управления финансами, производством и домом на основе мобильного Интернет.

Высокие скорости необходимы для передачи изображений, в том числе телевизионных, интеграции различных видов информации в контексте мультимедиа, взаимосвязи локальных, местных и территориальных сетей. Рост интеллектуальности сетей обеспечивается использованием микроэлектроники и применением программного обеспечения в каждом индивидуальном сетевом устройстве. Такая интеллектуальность позволяет увеличить гибкость, возможности и надежность сетей и делает более легким управление глобальными сетями даже в неоднородных средах.

Интеллектуальная сеть предполагает большое число служб как для пользователя, так и для администратора сети. К ключевым свойствам таких сетей относятся: легкая и динамичная система заказов инфокоммуникационных услуг и конфигурации в соответствии с изменяющимися потребностями пользователя, быстрая адаптация управления глобальными сетями в неоднородных средах. Происходит радикальное изменение роли пользователя в управлении сетью, т.е. переход от пассивного пользования к роли активного клиента.

Беспроводные средства и миниатюризация приводят к глобальному распространению терминалов и мобильности оконечных устройств и тем самым к глобальной мобильности и повсеместности доступа к

инфокоммуникациям. Миниатюризация электронных устройств, возрастающее проникновение стандартов PCMCIA (Personal computer memory card industry association) и снижение стоимости приводят к созданию и более широкому использованию терминалов с широким спектром функций (приложений) и разнообразием их размеров и конфигураций.

Способность к взаимодействию двух и более систем или компонентов для обмена и использования информации (интероперабельность) дает возможность создавать инфокоммуникационные системы производства и бизнеса, науки и образования (например, CRM-системы) с возможностью удаленного управления ими, доступу к вычислительным ресурсам через сеть Интернет.

Еще большие перспективы использования ИКТ дает информационно-технологическая концепция Cloud Computing, называемая «облачные вычисления» или «облачные технологии», позволяющая на основе виртуальных баз данных и распределенных центров обработки данных (ЦОД) оказывать услуги. По определению Национального института стандартов и технологий США «Cloud Computing» - это модель обеспечения повсеместного и удобного сетевого доступа по требованию к пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов (сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения, приложениям и сервисам), которые могут быть оперативно предоставлены с минимумом административных усилий или взаимодействия с сервис-провайдером. Объединение ресурсов поставщика услуг для обслуживания большого числа потребителей и непостоянный характер потребления позволяют получать экономию на масштабах производства услуг, в перечень которых входят не только услуги вычисления, но и программное обеспечение, платформа и инфраструктура как услуги. Данная модель бизнеса представляет собой возможность использования потребителем виртуальной инфраструктуры для самостоятельного управления ресурсами обработки и хранения информации, сетями и прикладным программным обеспечением, а также для размещения собственного программного обеспечения и приложений.

Таким образом, решающее воздействие на реализацию перспективных направлений информатизации оказывают инфокоммуникационные технологии и инновации, представленные на рис. 4.

Рис. 4. Инфокоммуникационные технологии и инновации, влияющие на реализацию перспективных направлений информатизации

К наиболее кардинальным технологиям, которые окажут непосредственное влияние на развитие инфокоммуникаций и информационное общество, ученые относят создание сенсорных сетей и биологической подписи, применение мобильного терминала для выполнения всевозможных платежных операций, заказов и покупок товаров и услуг, технология виртуального присутствия в медицинском обслуживании, образовании и средствах массовых коммуникаций, осуществление связи посредством чтения мыслей человека с помощью гарнитуры с датчиками и т.д.

Анализ современных тенденций развития сетей электросвязи в мире свидетельствует о том, что в большинстве развитых стран завершается переход от аналоговых сетей электросвязи к цифровым. Администрации связи многих стран планируют предоставление абонентам различных услуг в пределах как узкополосной цифровой сети с интеграцией служб (со скоростями передачи до 2 Мбит/с), так и широкополосной сети (со скоростями до 140 Мбит/с).

Одним из перспективных направлений развития сетевых технологий служит концепция «интеллектуальной сети» - Intelligent Network (ИС) [1]. Архитектура ИС представляет собой комбинацию базовой сети и интеллектуальной надстройки (платформы) ИС, включающей узлы коммутации услуг и управления обслуживанием, а также систему управления услугами. Данная концепция предусматривает отделение управляющей информации от информации, передаваемой пользователем, что позволяет отделить функции коммутации от функций представления услуг, а значит, радикально изменить роль пользователя в управлении сетью и перейти от пассивного пользователя к роли активного клиента.

Во многих странах приняты программы создания «национальных информационных супермагистралей» (NII), включающие системы беспроводных телекоммуникаций, кабельного и цифрового телевидения, а также сети взаимосвязанных информационных систем, компьютеров и потребительских электронных систем, объединяющих дома, рабочие места и общественные институты.

Национальная инфокоммуникационная инфраструктура предназначается для обслуживания не только индивидуальных потребителей, ее услугами должны интенсивно пользоваться организации и административные учреждения. Кроме того, система сможет успешно применяться в образовательных целях (для достижения большего равенства в получении образования, создания распределенных библиотечных фондов), а также в области здравоохранения (консультации и диагностика на расстоянии, возможность непрерывного обучения медицинских работников), криминалистики, экономики и управления.

Что касается предполагаемых терминальных устройств, используемых в NII конечными потребителями, то в профессиональной среде в качестве оконечных устройств могут применяться мощные ПЭВМ или рабочие станции, предназначенные для работы с мультимедиа, интерактивное телевидение - многоцелевое взаимодействие пользователей с серверами на основе стандартного телевизионного оборудования, которое должно использоваться

также в качестве компьютера и универсального терминала всех видов цифровой связи.

Реализация достижений НТП и системное решение задач информатизации позволит создать инфокоммуникационную платформу информационного общества, которая позволит своевременно и адекватно реагировать на непрерывно возрастающие и меняющиеся потребности в инфокоммуникационном обслуживании абонентов Российской Федерации.

Конвергентный характер инфокоммуникационного развития

Современная система инфокоммуникаций представляет собой комплекс технических, программных средств и организационных мероприятий, обеспечивающий разнесенным в пространстве пользователям услуги, связанные с передачей и приемом актуальной информации, а также выполняющий заявки пользователей по обработке, хранению и выдаче информации в пределах имеющихся на данное время возможностей.

Анализ этапов развития связи и информатики за последние столетия показал тесную связь закономерностей преобразований в этих сферах с этапами НТП и развития человеческого общества. Инфокоммуникационное развитие происходит одновременно по нескольким направлениям (рис. 5).

Рис. 5. Характерные признаки и направления развития инфокоммуникаций

Системное направление развития инфокоммуникаций характеризуется конвергенцией технологий, систем, сетей и услуг, созданием глобальных

инфокоммуникационных сетей и систем, обеспечением абонентов персональным доступом к инфокоммуникационным сетям и информационным ресурсам в любой точке мира, подвижной связью, повышением интеллекта сетей, систем и терминалов на основе цифровизации и биокомпьютеризации, контентологией информационных ресурсов.

В технологическом направлении развития инфокоммуникаций выделяются широкополосность каналов и доступа к сетям с непрерывно увеличивающейся скоростью передачи информации, мультимедийность и мультисервисность оказания спектра услуг всех видов информации (речи, данных, видео, контента), интеграция различных сетей и терминалов, включая перевод ПК и телевизора в единый интегральный терминал абонента, интерактивность обслуживания потребителей, высокое качество услуг, соответствующее потребительским возможностям человека, интерактивность пользователя в реальном масштабе времени.

Для прикладного направления развития инфокоммуникаций и использования ИКТ в экономической деятельности характерны повышение интеллектуальности труда и новое качество производительных сил благодаря высоким технологиям и воплощению знаний в производство; мобильность трудовых ресурсов и международная миграция, виртуальная среда бизнеса, управления производством и реализацией продукции, диагностики оборудования; глобализация экономики, сетевые организационные структуры.

Прикладное применение ИКТ в социальной жизни людей вызывает сущностные изменения в лично-этической, культурной, просветительской и бытовой сферах: виртуальные ценности, виртуальная этика и мораль, электронизация библиотек, учебников, фонотек; дистанционные обучение, медицинская и экологическая диагностика, сервисное и справочное обслуживание, торговля товарами и услугами; формирование искусственного интеллекта, автоматизация (роботизация) жилья.

С точки зрения развития мировой экономики наиболее существенное влияние на связь и инфокоммуникации оказывают процессы интеграции и глобализации, выражающиеся в формировании транснациональных компаний. В свою очередь, это вызывает экспоненциальный рост информационных потоков и выдвигает ряд дополнительных требований к сетям связи по повышению их пропускной способности, живучести, безопасности [10, 13]. Распределение, получение и обмен информацией осуществляются через телекоммуникационные сети, которые должны быть способны доставлять информацию в различной форме в любой дом.

Инфокоммуникационные технологии (ИКТ) построения сетей передачи информации как самостоятельное понятие возникло лишь в середине XX века, а уже к концу века они проникли во все сферы человеческой деятельности. К числу факторов, оказавших определяющее воздействие на развитие ИКТ, следует отнести развитие микроэлектронной индустрии и вычислительной техники, а также успехи в оптоволоконной технологии и цифровых системах, широкополосных каналах и беспроводной связи.

Информационные технологии совершенствовались параллельно и взаимоувязано с развитием технологий связи, технических возможностей каналов связи, а также всеобщей компьютеризацией общества [1]. На рис. 6 наглядно представлена взаимосвязь компьютерной оснащенности и развития систем связи и технологий передачи информации.

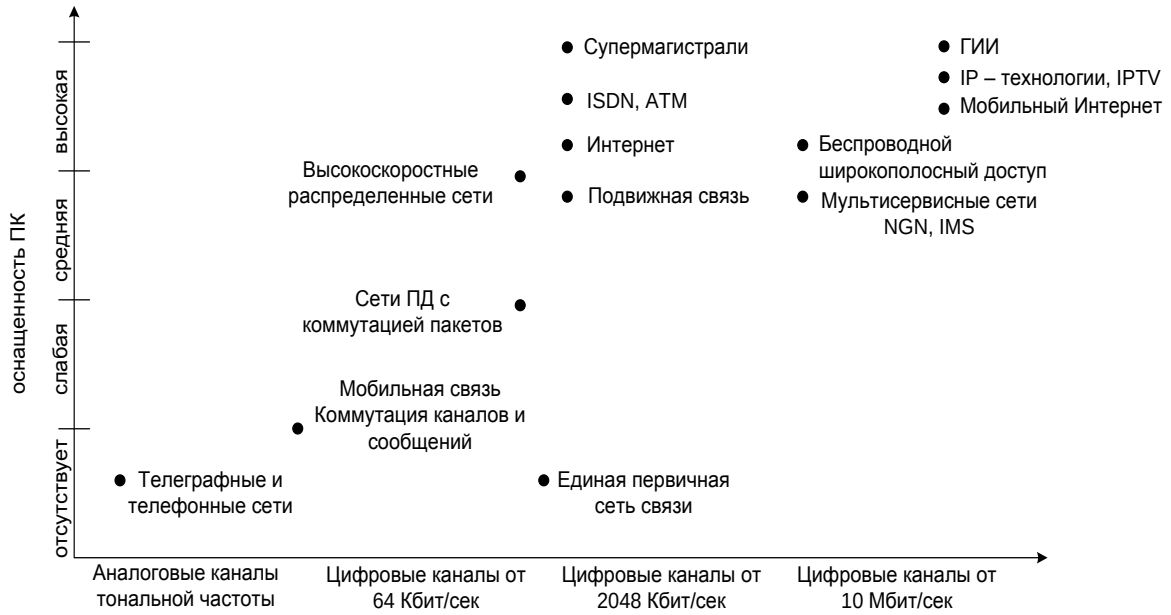


Рис. 6. Взаимосвязь развития связи и компьютерной оснащенности

Для развития связи и информатики характерны не только высокие темпы смены поколений технических средств и топологии построения сетей, но и ***взаимное проникновение и слияние, т.е. конвергенция.*** При этом конвергенция происходит как в глубину (технологии), так и в ширину (сети, виды связи, услуги) [14-16]. Конвергентный характер развития связи и информатики обусловил не только появление отрасли инфокоммуникаций, в которой сливаются сети, технологии и услуги, но и нарастание конвергенции видов деятельности различных отраслей, углубляя межотраслевые организационные процессы, в производстве товаров и услуг которых применяются инфокоммуникационные технологии (рис. 7).

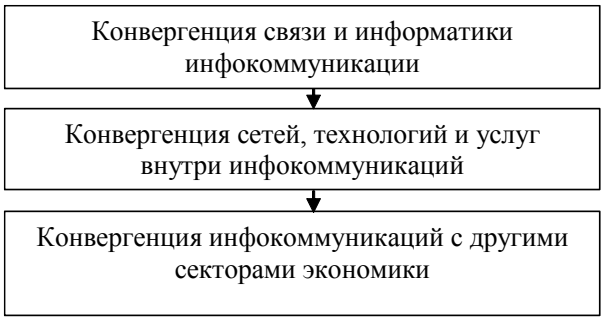


Рис. 7. Конвергентный характер развития экономики

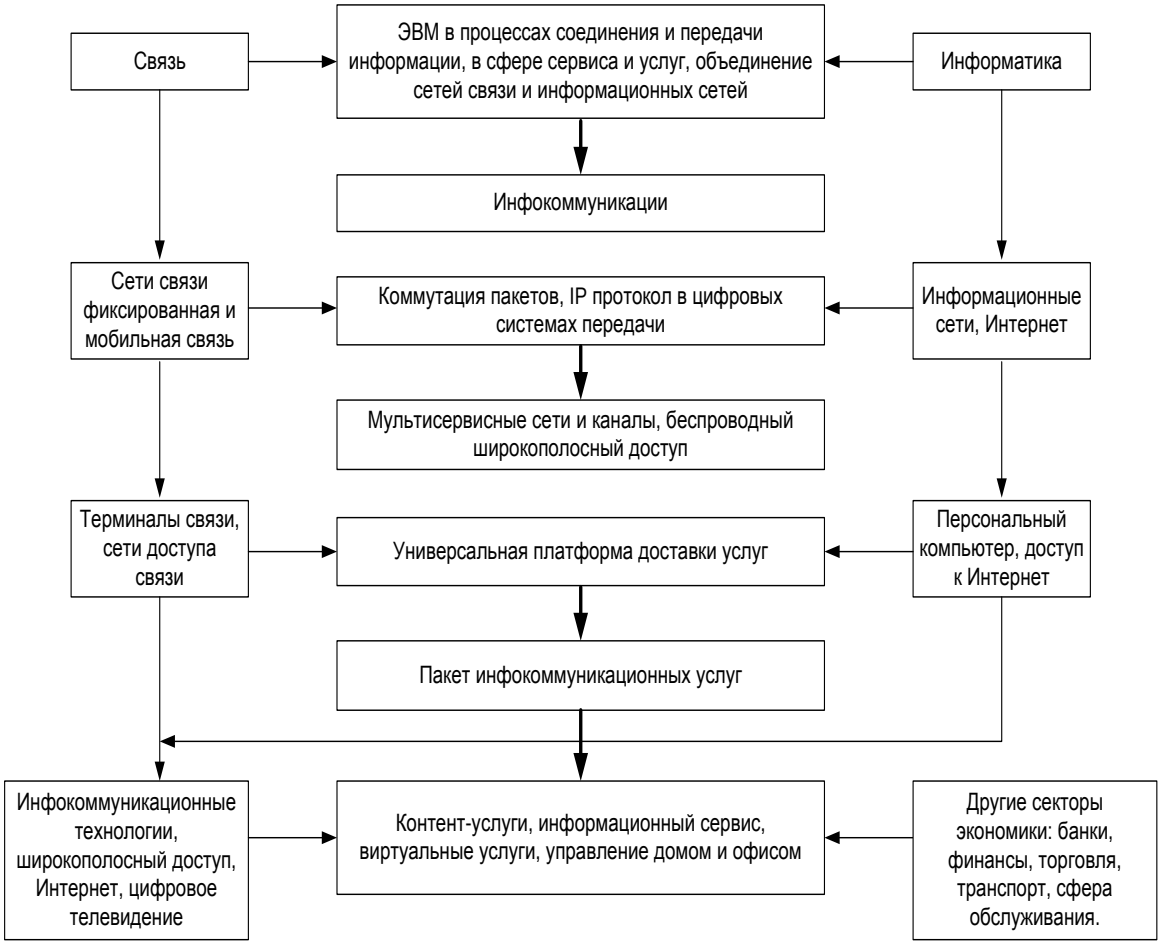


Рис. 8. Направления и виды конвергенции инфокоммуникационного характера

Для развития инфокоммуникаций характерны ***несколько видов конвергенции*** (рис. 8).

В первую очередь, слились в единый технологический процесс телекоммуникационные и информационные технологии, т.е. процессы связи стали осуществляться с применением ЭВМ как в сфере соединений и передачи данных, так и в сфере сервиса и предоставления дополнительных услуг связи.

Во-вторых, конвергенция объединила информационные и телекоммуникационные сети на основе коммутации пакетов и IP протокола. В условиях цифровых систем передачи информации превратив их в мультисервисные каналы и сети. С другой стороны, конвергенция объединила деятельность различных видов связи: фиксированной и подвижной, обеспечив пользователям беспроводный широкополосный доступ к любым видам связи и инфокоммуникационным сетям.

Третьим направлением конвергенции являются услуги. ИКТ позволяют предоставить абонентам единые пакеты услуг через различные терминалы или разные сети доступа. От функций, заложенных в сетевом оборудовании (вызов в телефонных фиксированных сетях, переадресация в сетях GSM), и специализированных решений по оказанию определенного набора услуг (SMS-центры в мобильных сетях, софт-свичи с услугами VoIP для корпоративных IP-сетей), совершается переход к универсальной платформе доставки услуг в

потенциально любом наборе (Parlay, Web-2.0). Особенность технологии Web-2.0 состоит в том, что на основе сети Интернет, Web-браузера как клиентского терминала и множества Web-сайтов сами клиенты становятся производителями услуг (распространителями информации и контента).

Важным инструментом предоставления контентных услуг, услуг масс медиа и справочно-информационного обслуживания, управления телефонной связью и даже домашним роботом в интерактивном режиме является цифровое телевидение (IPTV). Сети информационного телевидения кардинально изменяют место потребителя во взаимодействии с поставщиком услуг, переводя его из пассивного состояния к активному, в реальном времени взаимодействующему с производителями медиа и сервис услуг, контент-провайдерами и операторами связи. В IP-сетях на базе единой транспортной инфраструктуры можно интегрировать все виды приложений в единую сервисную платформу с пакетом услуг.

В четвертых, стремительное развитие инфокоммуникационных технологий и сетей повсеместно сказывается на экономике и социуме [14, 17]. Возможность обмена экономической информацией в электронной форме способствует распространению электронного бизнеса в виртуальной среде Интернета (облачные технологии). Вытекающие из глобальных инфокоммуникационных топологий сетевые и виртуальные структуры бизнеса, мобильность ресурсов и глобализация экономики ведут к формированию на Земле единого рынка труда, капитала, информации (знаний), товаров и услуг. Научно-технический прогресс и конвергентные процессы развития инфокоммуникаций оказывают кардинальное и принципиальное влияние на структуру экономики и социума, формируя информационное общество информационального характера, т.е. меняющего это общество изнутри [6, 17].

В настоящее время невозможно представить себе связь без ЭВМ и ЭВМ без связи. Значение связи резко возросло, благодаря заметному расширению использования ПК, автоматизации технологических и управленческих процессов, использования новых методов маркетинга и сбыта. В создании индустрии инфокоммуникаций, которая включает промышленность средств электросвязи, сети электросвязи, информационно-вычислительные сети, промышленность по производству ЭВМ, микроэлектроники и программного обеспечения, основу составляет конвергентное единство электросвязи и ЭВМ.

Перспективы развития инфокоммуникаций дают возможность осуществления поэтапной интеграции административных и бизнес структур управления России в глобальную информационную инфраструктуру - ГИИ (Global Information Infrastructure), представляющую собой технологическую базу глобального информационного общества [1, с. 21]. Фундаментом ГИИ являются инфокоммуникационные сети: стационарной и подвижной связи, Интернет, широкополосного доступа, глобальной спутниковой системы связи, объединяющей все континенты Земли.

В Рекомендациях МСЭ–ТУ.101 дано определение глобальной инфокоммуникационной инфраструктуры как совокупности сетей, оборудования конечных пользователей, информации и людских ресурсов,

которая может быть использована для доступа к полезной информации, связи пользователей друг с другом, работы, получения развлечений в любое время и из любого места по доступной цене, определяемой по некоторой глобальной шкале [11, с. 22]. В этом документе отмечается, что это сложное образование затрагивает интересы различных участников и пользователей, объединяемых сферой инфокоммуникаций.

Таким образом, речь сегодня идет не только о конвергенции связи и информатики, но и приобретении общих или сходных признаков и слиянии в новую комплексную отрасль экономической деятельности – инфокоммуникации, представляющую собой инфокоммуникационную инфраструктуру информационного общества. Действительно, современные сети электросвязи создают широкие возможности для использования средств вычислительной техники во всех сферах деятельности, тем самым обеспечивают необходимую транспортную базу для передачи и распределения информации, создавая основы становления новой инфокоммуникационной индустрии и нового рынка инфокоммуникационных услуг [14, 15].

Конвергентный характер развития инфокоммуникаций проявляется в создании конвергентных сетей (NGN, IMS), конвергентных услуг (Triple Play – голос, данные видео, Quad Play - голос, данные, видео, мобильная связь), конвергентных терминалов (смартфон, беспроводной шлюз, многомодовой терминал). Это способствует выделению сервиса (сферы обращения) в отдельный вид деятельности, интеграции производителей различных услуг с использованием ИКТ и сетей связи в комплексный сектор (отрасль) экономики, пересмотру рыночной политики и организации интегрированного бизнеса.

Информатизация общества, формируя материальную сторону жизнедеятельности человека, кардинально меняет его социальную составляющую. Повышение информированности и получение возможности доступа к любым информационным ресурсам высвобождает рабочее и свободное время человека, изменяет его жизненные ценности, в которых начинают приобретать значение виртуальные этика и мораль, информационно-духовные категории. Полнота интерактивного общения с производителями продуктов (услуг), автоматизация управления своим информационным багажом, временем, рабочим и домашним пространством, дистанционные обучение, диагностика и лечение, создание искусственного интеллекта, биокомпьютеров (роботов) способствуют дальнейшему развитию человеческого сознания и его возможностей в освоении мироздания.

Появление термина ***«инфокоммуникации»*** обусловлено конвергенцией связи и информатики и научными основами перспектив их развития. Технологической основой совершенствования современных систем связи являются достижения на стыке двух разделов науки - теории связи и информатики [6, 15, 17]. Информатика - научное направление, занимающееся изучением законов, методов и способов накапливания, обработки и передачи информации с помощью ЭВМ. Связь - научное направление, занимающиеся изучением законов, методов и способов передачи информации с помощью средств связи. Уже сейчас связь и информатика претерпевают существенные

изменения и трансформацию, при которых приемо-передающее устройство и компьютер сливаются в один аппарат, изменяется также и взаимодействие этих сфер.

Анализ мирового и отечественного опыта совершенствования инфокоммуникационного комплекса позволяет сделать вывод, что стимулируемое ростом конкуренции развитие связи и информатики предопределило переворот в мировых инфокоммуникациях и их предназначение как стратегической отрасли информационной эпохи.

По мнению ведущих экономистов стратегическая отрасль характеризуется тремя основными признаками [18]:

- во-первых, она должна иметь большое значение для поддержания национальной безопасности;
- во-вторых, в ней должны вестись научно-исследовательские и опытно-конструкторские исследования и разработки;
- в-третьих, такая отрасль должна иметь «привлекательный внешний вид», т.е. приносить экономические выгоды другим отраслям.

Инфокоммуникации, несомненно, удовлетворяют всем признакам стратегической отрасли и обеспечивают не только экономические выгоды, но и социальные преимущества. Инфокоммуникации помогают компаниям поддерживать соответствующий конкурентный уровень, способствуя их проникновению на новые рынки, созданию новых продуктов и услуг, увеличению скорости и улучшению качества принятия решения, сокращению бюрократического аппарата, увеличению производительности, развитию маркетинга, территориальному расширению зон влияния. Мир вступает в эпоху не зависящего от времени и расстояния бизнеса, в котором не существует более чисто национальных рынков. Инфокоммуникации сами представляют собой бизнес и развитие их структур приносит выгоду не только отдельным компаниям, но и регионам, городам и странам.

Используемые в настоящее время определения видов и форм экономической деятельности относительно связи и информационных технологий, инфокоммуникационных технологий и инфокоммуникаций далеки от сущности, фрагментарны, опираются на разные базовые предпосылки и ведут к искажению экономических показателей. Чтобы сформулировать с научных позиций признаки отнесения инфокоммуникаций и других близких терминов к определенным видам деятельности, рассмотрим сначала место инфокоммуникаций в системе экономики.

Роль инфокоммуникаций в национальной экономике определяется ее принадлежностью к производственной и социальной инфраструктуре. Инфокоммуникации, как и связь, относится к тем всеобщим условиям, без которых невозможны нормальное функционирование производства и обращения товаров, а также жизнедеятельность людей. Связывая производство и потребление товаров и услуг, обслуживая и производителей, и потребителей, связь расширяет их масштабы, активно воздействует на экономику, управление, развитие бизнеса и повышение благосостояния людей.

Развитие средств связи, увеличение объемов передаваемой информации (оказания услуг), применение инфокоммуникационных технологий в создании и передаче информации способствуют повышению эффективности общественного производства, социальному развитию общества, росту валового внутреннего продукта. При этом либерализация рынков, стирание национальных границ, всемерная информатизация общества обусловливают значительный рост объемов информации, для передачи которой необходимы опережающие темпы развития связи, способствующие, в свою очередь, ускорению научно-технического прогресса (НТП) и росту экономики.

Воздействие НТП на функциональную структуру производства проявляется, прежде всего, в изменении состава и качества как традиционных элементов - орудия и предметы труда, трудовые ресурсы, так и усилении роли информационных ресурсов. Кроме того, информатизация общества, государственного аппарата законодательной и исполнительной власти, управления производством товаров и услуг, вызывает постоянный рост объема информации и требований к скорости ее передачи [17].

Огромная роль в создании информационного общества принадлежит отрасли инфокоммуникаций, обеспечивающей доступ к информационным ресурсам, передачу информации, реализацию информационных технологий, информационное взаимодействие производств, секторов экономики и людей. Эффективное использование информационных ресурсов и технологий возможно только на основе создания информационного пространства, реализуемого посредством инфраструктуры инфокоммуникаций. Назначение инфокоммуникаций состоит, во-первых, в объединении локальных вычислительных систем, персональных компьютеров, баз (банков) данных на основе сетей; во-вторых, в формировании нового технологического уклада и интеллектуальной платформы в результате конвергенции связи и информатики на основе применения инфокоммуникационных технологий.

Современная система инфокоммуникаций представляет собой *комплекс* технических, программных средств и организационных мероприятий, обеспечивающий разнесенным в пространстве пользователям услуги, связанные с передачей и приемом актуальной информации, а также выполняющий заявки пользователей по обработке, хранению и выдаче накопленной информации в пределах имеющихся на данное время возможностей. В процессе создания информационного пространства *инфокоммуникации выполняют двоякую роль:* транспортно-сетевой среды (инфокоммуникационной инфраструктуры) и инфокоммуникационного ресурса (фактора) производства товаров и услуг. Поэтому в ходе информатизации общества изучаемый сектор экономики выходит за рамки отрасли связи, приобретает интегрированный характер и распространяется на явления и процессы, протекающие в сфере деятельности информации и связи [18, 19].

В организационном отношении инфокоммуникации имеют сложную сетевую телекоммуникационную структуру, состоят из множества объектов, выполняющих определенные функции по передаче и обработке информации, формированию контента и обслуживанию потребителей. Статистика,

характеризующая развитие инфокоммуникаций, позволяет установить, в какой степени удовлетворяются потребности клиентуры в инфокоммуникационных услугах и средствах, как выполняется прогноз развития сетей связи и сферы инфокоммуникационного обслуживания, каковы экономические результаты и качество работы организаций отрасли и других участников рынка инфокоммуникационных услуг.

Важнейшими особенностями отрасли инфокоммуникаций являются невещественный характер продукта и предоставление инфокоммуникационных услуг всем секторам экономики и населению. Определение продукта и выбор методологии его исчисления опирается на понятие отрасли экономики и концепцию экономического производства.

Отрасль экономики – совокупность организаций, предприятий, учреждений, производящих однородные товары и услуги, использующих однотипные технологии, удовлетворяющих близкие по природе потребности. В рыночной экономике под отраслью принято понимать обособленную область деятельности или совокупность производителей одного блага, которые продают его на одном рынке. Однако большинство предприятий производят не один, а несколько продуктов. В результате продукция большинства предприятий не относится четко к какому-то одному благу или какой-то одной группе товаров (услуг) или конкретной отрасли.

Многообразие областей общественного труда порождает соответствующее разнообразие отраслей, что, в свою очередь, предусматривает необходимость их классификации. До 2001 г. в российской практике учета и анализа результатов общественного разделения труда использовался общероссийский классификатор «Отрасли народного хозяйства» (ОКОНХ), в соответствии с которым выделялось 23 отрасли народного хозяйства.

В ОКОНХ классификационной единицей отрасли являлось состоящее на самостоятельном балансе предприятие, учреждение, организация. Каждое отдельное предприятие (организация) в зависимости от характера основного вида деятельности могло быть отнесено к одной какой-либо отрасли народного хозяйства. С точки зрения характера общественного разделения труда и участия в создании совокупного общественного продукта и национального дохода все отрасли подразделялись на сферу материального производства и непроизводственную сферу.

К сфере материального производства были отнесены все виды деятельности, создающие материальные блага в форме продуктов, энергии, в форме перемещения грузов, хранения продуктов, сортировки, упаковки и других функций, являющихся продолжением производства в сфере обращения. Остальные виды деятельности, в процессе которых создаются не материальные блага, а услуги, относились к непроизводственной сфере деятельности.

В сферу материального производства входили 14 отраслей народного хозяйства: промышленность, лесное хозяйство, транспорт и связь, торговля и общественное питание, информационно-вычислительное обслуживание, сельское и рыбное хозяйство, строительство, заготовки, операции с недвижимым имуществом, общая коммерческая деятельность по обеспечению

функционирования рынка, материально-техническое снабжение и сбыт, геология и разведка недр, геодезическая и гидрометеорологическая службы. При этом в ОКОНХ в рамках отрасли «Промышленность» было выделено 16 комплексных отраслей промышленности, включающих 405 отраслей производства.

К непроизводственной сфере относились 9 отраслей народного хозяйства и видов деятельности: жилищно-коммунальное хозяйство; здравоохранение, физическая культура и социальное обеспечение; культура и искусство; финансы, кредит, страхование, пенсионное обеспечение; образование; управление; непроизводственные виды бытового обслуживания населения; наука и научное обслуживание; общественные объединения.

В соответствии с концепцией материального производства, связь, как и транспорт, относились к сфере материального производства в части обслуживания производства, к непроизводственной сфере – в части обслуживания населения.

С 6 ноября 2001 г. в России был введен общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД) взамен ОКОНХ и Общероссийского классификатора видов экономической деятельности, продукции и услуг (ОКДП). ОКВЭД построен таким образом, что объекты классификации (виды деятельности) включают все или почти все виды деятельности, осуществляемые в какой-либо отрасли. В этом случае группировки видов экономической деятельности по наименованию в основном совпадают с группировками предприятий, образующих отрасль, которым присущи эти виды экономической деятельности. В указанном смысле отрасль представляет, как бы сборку различных видов экономической деятельности.

ОКВЭД-2001 построен в соответствии со Статистической классификацией видов экономической деятельности в Европейском экономическом сообществе - Statistical classification of economic activities in the European Community (NACE Rev. 1). Особенности, отражающие потребности российской экономики по детализации видов деятельности, учитываются в группировках ОКВЭД с пяти- и шестизначными кодами. ОКВЭД-2001 содержал 17 разделов, обозначенных буквами от A до Q. Раздел «I» предназначен для экономической деятельности в области транспорта и связи, раздел «К» выделен для отражения операций с недвижимым имуществом, арендой и предоставлением услуг, в разделе «О» отражаются прочие коммунальные, социальные и персональные услуги.

Объектами классификации в ОКВЭД являются виды экономической деятельности. Экономическая деятельность имеет место тогда, когда ресурсы (оборудование, рабочая сила, технологии, сырье, материалы, энергия, информационные ресурсы) объединяются в производственный процесс, имеющий целью производство продукции (оказание услуг). Экономическая деятельность характеризуется затратами на производство, процессом производства и выпуском продукции (оказанием услуг).

Экономическая теория в рамках расширенной концепции производства, действующей в рыночной экономике и лежащей в основе системы

национальных счетов, определяет экономическое производство (экономическую деятельность) как процесс создания товаров и услуг. Товары, как результаты процесса экономического производства, имеют материально-вещественную форму, на них могут быть распространены права собственности и имеется спрос. Услуги, как результат экономической деятельности, не имеют вещественной формы и не могут быть представлены вне самого процесса производства, но на них распространяются права собственности, имеется спрос, и они могут быть реализованы на рынке.

В соответствии ***с расширенной концепцией производства***, деятельность, связанная с использованием вычислительной техники и информационных технологий, массовых коммуникаций и связи (почтовая и электрическая связь) относится ***к производству услуг,*** в котором выделяются обособленные виды деятельности (сектора). Конвергентные процессы и научно-технический прогресс ведут к сближению и объединению этих секторов экономики в одну ***комплексную отрасль инфокоммуникаций,*** производящую услуги на основе телекоммуникационных и информационных технологий, средств, сетей и других производственных ресурсов.

Отрасль инфокоммуникаций воплощает в себе процессы трансформации технической базы связи и информатики в техническую базу комплексной отрасли инфокоммуникаций, в которой экономическая деятельность по производству услуг осуществляется с помощью инфокоммуникационных технологий (ИКТ). ***Под отраслью инфокоммуникаций*** следует понимать экономическую деятельность в области информации и связи по приему, обработке, хранению, накоплению, распределению, передаче и доставке информации (сообщений, отправлений), осуществляемую посредством совокупности аппаратно-программных средств, вычислительных и телекоммуникационных сетей, информационных и других производственных ресурсов. Конечным продуктом комплексной отрасли инфокоммуникаций являются ***инфокоммуникационные услуги*** как результат экономической деятельности в области информации и связи по удовлетворению потребностей пользователей в передаче, обработке, накоплении и распространении информации, а также в доступе к информационным ресурсам с помощью информационных и телекоммуникационных технологий и сетей.

Другими словами, отрасль инфокоммуникаций – это комплекс организаций (предприятий), обладающих общностью создаваемых инфокоммуникационных услуг, применяемых технологий, факторов производства и удовлетворяемых потребностей. В соответствии с расширенной концепцией производства компоненты отрасли инфокоммуникаций по производству инфокоммуникационных услуг представляют собой единую отрасль независимо от сферы потребления ее услуг, поэтому для оценки результатов деятельности в области информации и связи используется единая система показателей независимо от группы потребителей.

Деятельность организаций сектора связи направлена на прием, передачу и доставку информации и почтовых отправлений; *в секторе информационных технологий* – на обработку и накопление информации, создание

информационных продуктов, применение информационных технологий в государственном управлении, производстве и социуме; *в секторе массовых коммуникаций* – на распространение информации, в том числе радиовещания и телевидения, и информационных продуктов.

Результаты экономической деятельности комплексной отрасли инфокоммуникаций в соответствии с версией Общероссийского классификатора видов экономической деятельности 2001 г. отражались в различных разделах ОКВЭД-2001, а именно: отрасли связи - в разделе «I» – класс 64 «Связь», сектора информационных технологий - в разделе «K» – класс 72 «Деятельность, связанная с использованием вычислительной техники и информационных технологий», сектора массовых коммуникаций, телевидения и радиовещания – в разделе «O» – класс 92 «Деятельность по организации отдыха и развлечений, культуры и спорта», включая подкласс 92 «Деятельность в области радиовещания и телевидения».

В новой версии ОКВЭД 2, построенной на основе гармонизации со второй версией европейской классификацией NACE Rev. 2 (КДЕС ред. 2) и вводимой с 1 января 2016 г., результаты деятельности комплексной отрасли инфокоммуникаций нашли достаточно полное отражение в разделе «J» – «Деятельность в области информации и связи» в 6 классах и в разделе «H» в 1 классе (рис. 9) [20]. Таким образом, деятельность в области информации и связи отражается в одной укрупненной секции ОКВЭД 2 по шести компонентам (рис. 9): «издательская деятельность», «производство кинопродукции и телевизионных программ»; «телевизионное и радиовещание»; «телекоммуникации»; «разработка программного обеспечения»; «информационные технологии (ИТ)».

Деятельность в области почтовой связи в новой версии ОКВЭД 2 отнесена к разделу «H» и выделена в классе ОКВЭД 53 – «Деятельность почтовой связи и курьерская деятельность».

Одним из фундаментальных положений расширенной концепции производства является разграничение рыночного и нерыночного производства в зависимости от направлений использования производственных товаров и услуг и характера цен потребления. Рыночный выпуск товаров и услуг осуществляется по экономически значимым ценам, складывающимся под влиянием спроса и предложения.

Организации инфокоммуникаций в основном реализуют услуги по тарифам, складывающимся под доминирующим влиянием спроса пользователей, и являются рыночными производителями. Нерыночное производство товаров и услуг предназначено для собственного использования (например, в связи – служебные телеграммы, письма, телефонные соединения) или для предоставления потребителям бесплатно (секограммы – почтовые отправления для слепых) или по ценам, не являющимся экономически значимыми (общедоступные универсальные услуги почтовой и электрической связи).

В рамках расширенной концепции производства (методологии СНС) центральной является классификация хозяйственных единиц по секторам

экономики, в которой выделяются: *нефинансовые предприятия,* занимающиеся производством товаров и рыночных нефинансовых услуг, к которым относятся услуги связи, информационные технологии и массовые коммуникации [18, с. 9-17].

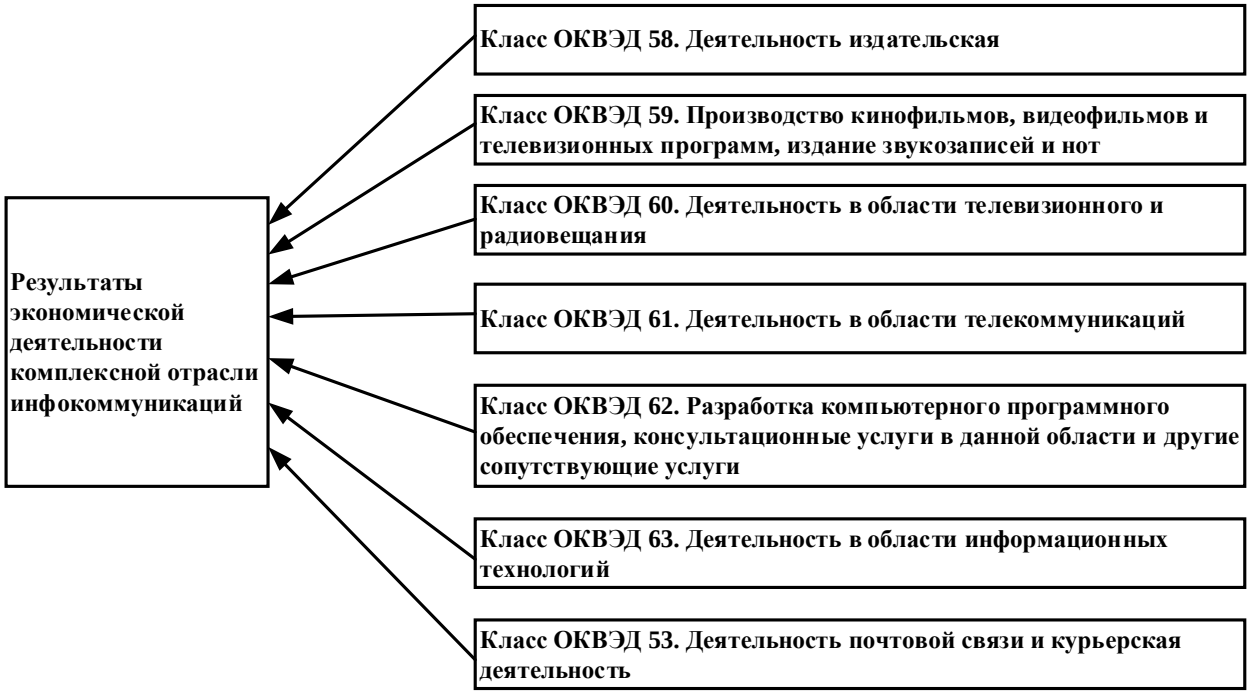


Рис. 9. Отражение результатов деятельности комплексной отрасли инфокоммуникаций в новой версии ОКВЭД 2

Основной целью деятельности отрасли инфокоммуникаций как сектора нефинансовых предприятий является получение прибыли или иной экономической выгоды путем реализации инфокоммуникационных услуг, технических средств и информационных продуктов по тарифам (ценам), позволяющим возместить их текущие производственные расходы (при этом часть издержек может покрываться за счет субсидий и дотаций из государственного бюджета: федерального, субъектов Российской Федерации, местных). Основным источником доходов (ресурсов) отрасли инфокоммуникаций является выручка от реализации услуг.

Данные определения важны для ведения национальных счетов, оценки вклада инфокоммуникаций в ВВП, которые учитывают не только сегодняшнее положение в учете результатов деятельности отрасли инфокоммуникаций, но и будущие структурные изменения в национальной экономике с учетом характера НТП и последствий информатизации. Следует четко понимать, что отрасли, использующие инфокоммуникационные технологии и сети в своем производстве товаров и услуг, остаются в установленной классификации видов экономической деятельности (по основному конечному продукту).

Распространение ИКТ ведет к интеграции бизнеса и альянсам организационных структур как внутри отрасли инфокоммуникаций, так и в сфере производства других услуг. Конвергентная среда

инфокоммуникационного бизнеса создает предпосылки включения дополнительных услуг других секторов экономики в пакет инфокоммуникационных услуг (электронные расчеты, телебанкинг, телемедицина) и создания новых участников инфокоммуникационного рынка (контент-провайдер, сервис-провайдер, системный интегратор).

С другой стороны, отдельные отрасли не только используют ИКТ в своем производстве, но и создают телекоммуникационные сети с предоставлением услуг связи клиентуре (ОАО «Транстелеком»). Таким образом, конвергентный характер развития инфокоммуникаций стирает границы отраслей, формируя в инфокоммуникационном пространстве интегральный сектор, и меняет роль потребителя во взаимоотношениях с производителями и другими участниками рынка.

Информационно-экономический закон и другие закономерности развития инфокоммуникаций

Конвергенция связи и информатики обеспечила новый виток развития всех секторов национальной экономики и социальной жизни в различных направлениях и привела к прогрессивным изменениям как в сфере производства, так и потребления товаров и услуг. За последние 30 лет инфокоммуникации приобрели системообразующую роль в формировании единого информационного пространства как в национальном, так и в мировом масштабах и обеспечении устойчивых темпов.

Между темпами экономического роста и развитием отрасли инфокоммуникаций имеется тесная взаимосвязь. О наличии тесной взаимосвязи между уровнями развития связи и макроэкономики ученые и практики заговорили в середине семидесятых годов XX века. Так А. Джипп [21] установил корреляционную зависимость между телефонной плотностью (ТП) и валовым внутренним продуктом, приходящимся на душу населения (ДВВП) по различным странам (рис. 10).

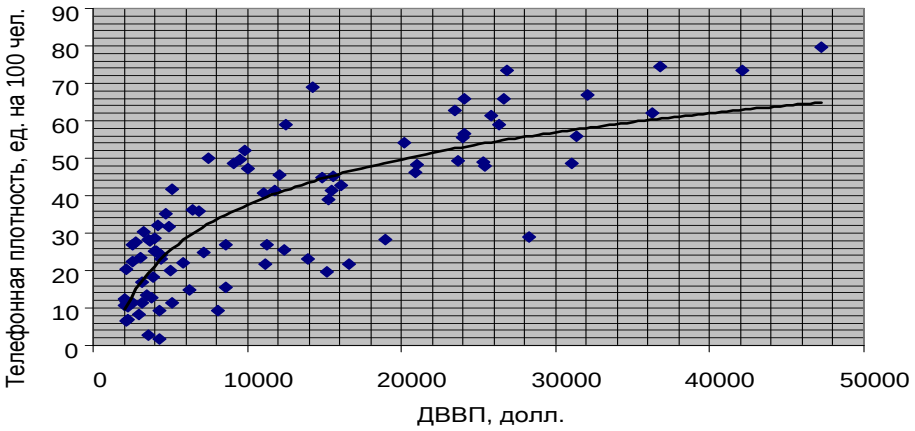


Рис. 10. Зависимость телефонной плотности от валового внутреннего продукта, приходящегося на душу населения

В логарифмическом масштабе зависимость телефонной плотности от душевого уровня ВВП является прямой линией. Положение точек над прямой линией свидетельствует о превышении уровня развития сетей связи над уровнем развития экономики страны, а расположение точек под прямой линией – о недостаточном развитии связи. *Чем выше экономический уровень страны, т.е. больше ДВВП, тем выше уровень развития связи.* Такая же взаимосвязь действует и в разрезе групп населения и для других показателей развития инфокоммуникаций: плотности персональных компьютеров, терминалов подвижной связи, пользователей сети Интернет.

По сути диаграмма Джиппа отображает информационно-экономический закон развития мировой экономики и стохастическое соответствие уровня развития инфокоммуникационной инфраструктуры уровню экономического развития. Из диаграммы Джиппа следует основной вывод: в среднем уровень развития связи, информатики и инфокоммуникаций должен соответствовать уровню развития экономики страны. Если первый значительно превышает второй, то возможно недоиспользование введенных инфокоммуникационных мощностей («замораживание капитала»), если уровень развития ИК значительно ниже, то это приводит к сдерживанию (замедлению) темпов роста национальной экономики.

Взаимосвязь развития инфокоммуникаций и национальной экономики подтверждается также результатами исследований в сфере объемов предложенной и потребленной информации. На рис. 11 представлена динамика трех показателей: общий объем предложенной информации, общий объем потребленной информации и реальный ВВП (на примере Японии) [22].

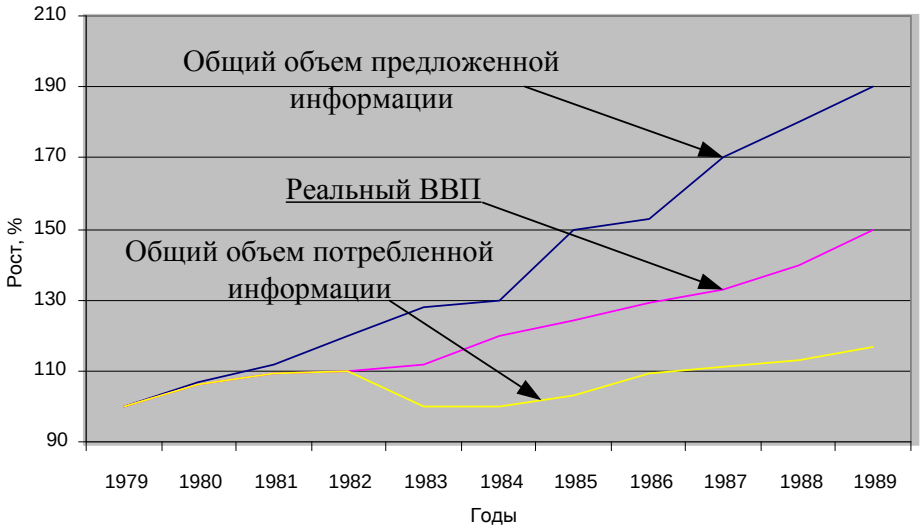


Рис. 11. Темпы роста ВВП, объема предложенной и потребленной информации

Как видно из графика, уровень потребленной информации составляет 0,6 от уровня предложенной (или произведенной) информации. При этом объем предложенной информации за 10 лет увеличился в 1,92 раза, в то время как потребленной – лишь в 1,2 раза, ВВП вырастает в 1,5 раза. Полученные тенденции свидетельствуют о том, что объемы предложенной и потребленной

информации связаны с экономическим развитием и в определенной мере пропорциональны ВВП, т. е. между объемом созданной и потребленной информации и ВВП существует четкая закономерность.

Закономерности развития телекоммуникаций во взаимосвязи с макроэкономикой исследовались и российскими учеными [8, 23]. Варакин Л.Е. сформулировал и доказал информационно-экономическую закономерность: объем переданной средствами связи информации, созданной в стране за год, пропорционален ВВП страны.

Информационно-экономическая закономерность представляет собой линейную функцию вида:

$$I = A \cdot G, \tag{5}$$

где I – объем информации в битах; G – валовой внутренний продукт.

Информационно-экономический закон может быть сформулирован и обратным образом - валовой внутренний продукт, созданный в стране за год, пропорционален объему передаваемой производственной (используемой в производстве) информации:

$$G = \frac{I}{\mathrm{A}} = \mathrm{A}^{-1} \cdot I \tag{6}$$

В представленных уравнениях важен коэффициент A, который показывает количество информации, приходящееся на единицу затрат на передачу производственной информации, или стоимость одного бита информации. Для оценки стоимости единицы информации можно использовать данные о вкладе в ВВП по величине доходов от услуг отрасли.

Информационно-экономический закон развития инфокоммуникаций состоит *в обеспечении пропорционально-опережающих темпов роста экономики инфокоммуникаций по сравнению с макроэкономическим ростом,* т.е. чем выше благосостояние общества (больше ВВП), тем больше объем предназначенной для передачи средствами связи производственной информации и наоборот [8]. Мировой опыт и мнения ученых сводятся к тому, что развитие инфокоммуникаций должно опережать развитие экономики страны. Инфокоммуникации, развивающиеся пропорционально уровню экономического потенциала общества, не будут сдерживать его рост в случае подъема экономики страны.

Факторами роста объема создаваемой в обществе информации являются производительность ПК, их число и время их использования пользователем. Отсюда объем вырабатываемой с помощью ПК информации равен:

$$I_K = \beta N_K P_K T_K, \tag{7}$$

где N_K – число компьютеров (ед.); P_K – удельная производительность компьютера (ЧИП) (опер./с); T_K – среднее время использования одного ПК (определяется физиологическими возможностями операторов (людей)); β – коэффициент пересчета производительности используемого ЧИП в скорость передачи информации конкретного ПК (бит/опер.).

Установлено, что производительность ПК (число операций в секунду или число транзисторов в ЧИП) за последние 25 лет возрастала вдвое каждые

18 месяцев, т.е. на 60% в год, или в 10 раз за каждые 5 лет [16, 25]. Эта закономерность получила название «закон Мура» по имени главы фирмы ИНТЕЛ. Данная тенденция сохранится до 2015-2020 гг., пока не будет достигнут физический предел реализации 1 бита информации с помощью одного электрона (предел электронной технологии).

Для оценки объемов переданной по сетям связи информации I_C используется формула:

$$I_C = N_C \nu_C T_C, \tag{8}$$

где N_C – среднегодовое число абонентских устройств связи – источников информации, T_C – среднее время работы 1 терминала в год, V_C – средняя скорость передачи информации по действующим терминалам фиксированной, подвижной связи, установкам передачи данных.

Пропускная способность сети связи – способность сети обеспечивать передачу всех поступающих на ее вход потоков информации без замедления и искажений. При низких скоростях ПД (64 Кбит/с) обеспечение пропускной способности сетей связи достигалось расчетом основных каналов связи с учетом периодов и часов наибольшей нагрузки. Современные мультисервисные сети проектируются так, чтобы пропускная способность цифровых каналов со скоростью от 10 Мбит/с опережала общие потребности в информационном обмене.

На основании анализа роста входящих в формулы 7 и 8 сомножителей можно смоделировать формулы для прогнозирования объемов создаваемой и потребляемой информации, т.е. телекоммуникационной и информационной составляющих производственной информации:

$$\Delta I_C = N_C (1+a)^n \cdot V_C (1+b)^n \cdot T_C, \tag{9}$$

$$\Delta I_K = \beta \cdot N_K (1+c)^n \cdot P_K (1+d)^n \cdot T_K, \tag{10}$$

где a и c – среднегодовые темпы прироста числа абонентских терминалов связи и ПК; b и d – среднегодовые темпы прироста скорости передачи информации и производительности ПК (скорости обработки информации); n – количество лет.

Для выявления взаимосвязи развития инфокоммуникаций и макроэкономики немаловажное значение имеет *спрос на инфокоммуникационные услуги,* определяемый не только материальными факторами (уровень доходов, благосостояния, половозрастные и демографические характеристики), но и социальными факторами (изменение предпочтений, уровень насыщения и заменяемости, соотношение цены и качества, независимость от оператора, свобода потребления по месту, времени и набору услуг и др.).

Обеспеченность населения, его доходы и платежеспособность являются одними из главнейших факторов, определяющих спрос на инфокоммуникационные услуги. Для оценки распределения доходов населения используются функция распределение (кривая) Лоренца и коэффициент Джини. Кривая Лоренца дает наглядное представление о характере распределения изучаемых признаков в прямоугольной системе координат, на оси абсцисс которой откладываются накопленные частоты объема совокупности, на оси

ординат – накопленные частоты объема признака. Если распределение строго равномерно, то линия равномерного распределения изображается прямой по углом 45º. Чем сильнее концентрация изучаемого признака, тем заметнее кривая Лоренца отклоняется от линии равномерного распределения, чем слабее концентрация – тем ближе кривая к прямой [18, 24].

Степень концентрации количественно оценивается с помощью коэффициента Джини:

$$G = 1 - 2\sum d_{xi} d_{yi}^{н} + \sum d_{xi} d_{yi} \qquad (11)$$

где d_{xi} – доля i-той группы в общем объеме совокупности (численность населения); d_{yi} – доля i-той группы в общем объеме признака (денежные доходы); $d_{yi}^{н}$ – накопленная доля i-той группы в общем объеме признака.

Величина коэффициента Джини может варьировать от 0 до 1 (от 0 до 100%), при этом, чем выше значение показателя, тем более неравномерно распределены доходы в обществе. Если исследуемая совокупность разделена на 10 групп и частоты выражены в процентах, то коэффициент Джини имеет вид:

$$G = 110 - 0,2^{\sum d_{yi}^{н}} \qquad (12)$$

Росстат проводит анализ распределения общего объема денежных доходов и дифференциации денежных доходов населения России с 1995 г. по 10% и 20% группам (табл. 5 и 6). Результаты оценки концентрации среднедушевых денежных доходов населения России в 2010 г. по 10% группам (коэффициент Джини равен G = 110 – 0,2 · 349,2 = 40,16%) указывают на весьма заметный уровень концентрации доходов у определенной группы людей (табл. 5) и отклонение кривой Лоренца от равномерного распределения доходов жителей России, т.е. о значительной неравномерности распределения доходов россиян (рис. 12).

Таблица 5. Распределение денежных доходов населения Российской Федерации в 2010 г. по 10 % группам*

Группы населения, ранжированные по уровню доходов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Всего
Доля доходов по группам населения, %	2,2	3,4	4,3	6,0	7,1	8,2	12,3	10,4	10,1	36,0	100
Накопленные частоты, %, $d_{y_i}^{H}$	2,2	5,6	9,9	15,9	23,0	31,2	43,5	53,9	64,0	100	349,2

*Данные Росстата за 2010 г.

Анализ распределения доходов населения России с 1995 г. по 2015 г. показывает, что при росте среднемесячных доходов россиян за 20-летний период в 2,7 раза (с 10,4 тыс. руб. до 27,9 тыс. руб.) наблюдается положительное снижение доли населения с наименьшими доходами с 6,1% до 5,2%, хотя увеличиваются не средние группы, а крайние доходов группы населения с наибольшими доходами (табл. 6).

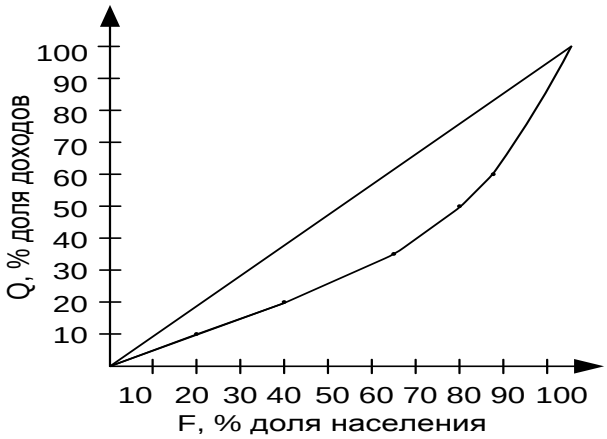


Рис. 12. Распределение доходов населения России в 2010 году

Таблица 6 – Динамика распределения и дифференциации денежных доходов населения Российской Федерации по 20 % группам

	Доля доходов по 20% группам, %						
Годы	1 (с наименьшими доходами)	2	3	4	5 (с наибольшими доходами)	Децильный коэффициент, раз	Коэффициент Джини
1995	6,1	10,8	15,2	21,6	46,3	13,5	0,387
2001	5,7	10,4	15,4	22,8	45,7	13,9	0,397
2005	5,4	10,1	15,1	22,7	46,7	15,2	0,409
2010	5,2	9,8	14,8	22,5	47,7	16,6	0,421
2015 (оценка)	5,2	9,8	14,9	22,6	47,4	16,2	0,417

*Данные Росстата по результатам выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств

Такая структурная динамика свидетельствует об углубляющейся дифференциации доходов и неравномерности их распределения по группам населения – коэффициент Джини за 20 лет повышается на 3% (с 0,387 до 0,417). Закономерности распределения доходов жителей страны одновременно являются закономерностями распределения инфокоммуникационных услуг среди населения, так как социологическими исследованиями установлено, что чем выше доход определенной группы населения, тем выше порог потребления услуг.

Взаимосвязь между доходами населения и потреблением инфокоммуникационных услуг в первом приближении может быть представлена прямо пропорциональной зависимостью

$$f(x) = \rho(t)\varphi(y), \qquad (13)$$

где $f(x)$ – функция распределения доходов; $\varphi(y)$ – функция потребления услуг связи; $\rho(t)$ – коэффициент пропорциональности, изменяющийся во времени, который представляет собой долю от доходов той или иной группы населения, которую она тратит на приобретение услуг связи [15].

Для определения потенциального числа потребителей по различным видам услуг и средств инфокоммуникаций необходимо учитывать

логистический закон развития, который отражает поведение товара на рынке в течение его срока «жизни» [6, с. 90-91]. Насыщение характеризует, с одной стороны, потерю у товара или услуги привлекательности потребительских свойств, с другой стороны, – означает конец его «жизни». Это поведение происходит по логистической кривой, аналитическое выражение для которой имеет вид:

$$Y(t) = \frac{B}{1 + \exp\left[-(t - t_0)/T\right]}, \qquad (14)$$

где B – уровень насыщения; $T = 1/Bk$, t_0 – момент перегиба кривой; k – коэффициент дифференциального уравнения $Y' = k \times Y(B - Y)$, решением которого является выражение (14).

Конвергенция услуг, систем и средств связи и информатики приведут к снижению потребности населения в средствах инфокоммуникаций и замене отдельных услуг их пакетом. Поэтому при прогнозировании развития инфокоммуникаций целесообразны модели спроса, учитывающие макрогенерацию (заменяемость) услуг и средств инфокоммуникаций.

На рис. 13 представлен график [1, 23], характеризующий ***макрогенерацию технологий в инфокоммуникациях.*** *Первая макрогенерация* (технологическая волна) имела ведущим элементом системы, *вторая* – персональные компьютеры, *третья* – инфокоммуникационные сети с IP-протоколом, *четвертая* – пакетные и контент-услуги в соответствии с индивидуальными пожеланиями клиента. При этом формы макрогенерации во времени напоминают жизненные циклы, рассмотренные ранее. Этот график подтверждает важную закономерность развития инфокоммуникаций, а именно, переход от персонализации услуг и доступности сетей связи к интерактивному обслуживанию.

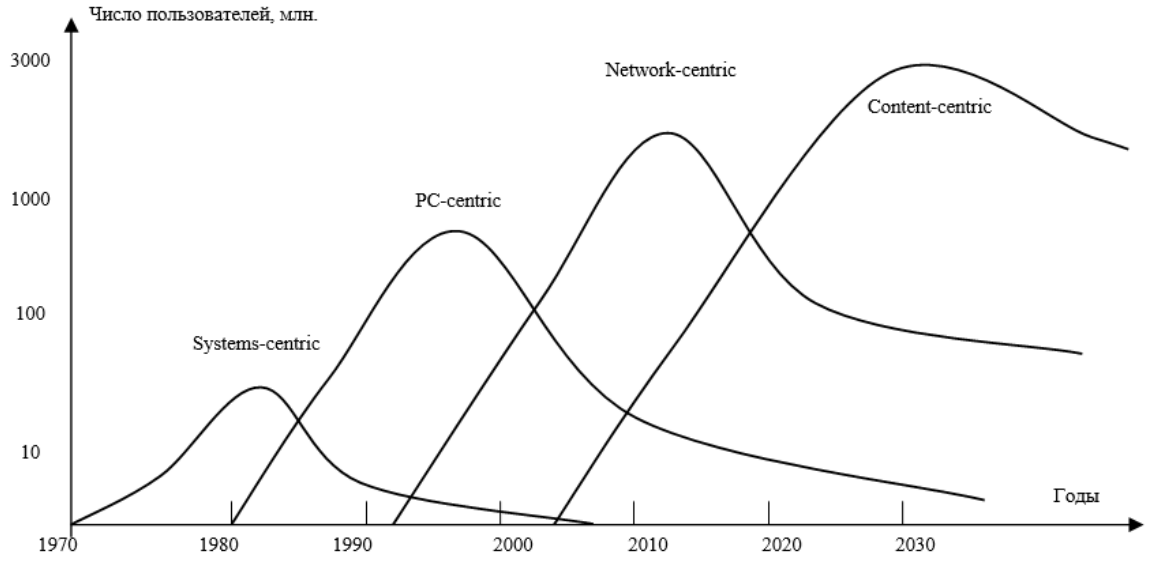


Рис. 13. Этапы развития инфокоммуникаций

Макрогенерация систем передачи и коммутации сообщений, технологий связи сопровождается кардинальным ростом скорости передачи информации.

При этом каждый вид связи имеет свой естественный предел (насыщение). Появление новых технологий, например, связь по сверхпроводящим структурам, дает дальнейший импульс развитию инфокоммуникаций.

Заключение

Проведенный взаимосвязанный анализ развития инфокоммуникаций и макроэкономики указал на наличие тесной связи между ними и действие информационно-экономического закона. Инфокоммуникации, развивающиеся пропорционально уровню экономического потенциала общества, не будут сдерживать его рост в случае подъема экономики страны. В то же время излишне быстрое развитие инфокоммуникаций, значительно превышающее рост экономического потенциала общества, может привести к низкому использованию вводимых средств и мощностей и, следовательно, является экономически необоснованным. Поэтому *информационно-экономический закон развития инфокоммуникаций* состоит в *обеспечении пропорционально-опережающих темпов роста по сравнению с макроэкономическим ростом.*

При кажущейся простоте информационно-экономического закона в записи (5) или (6) он имеет большое теоретическое и практическое значение. В области теории информации, информатики, связи и экономики аналитически доказан закон, объективно существующий в обществе и устанавливающий взаимозависимость между производственной информацией, создаваемой обществом, и его ВВП. С одной стороны, чем выше благосостояние общества (больше ВВП), тем больше объем потребляемой в производстве информации. С другой стороны, чем больше объем переданной средствами связи производственной информации, тем выше благосостояние общества. Таким образом, существование данного закона, который ранее подтверждался на базе большого числа статистических данных, получило четкое математическое доказательство, основанное на экономических и информационных понятиях [8].

С точки зрения практики информационно-экономический закон позволяет корректно прогнозировать развитие инфокоммуникаций на основе прогнозов развития экономики и объемов передаваемой информации. Например, если планируется увеличение ВВП в *К* раз, то, согласно формуле (5), в соответствующее число раз должен увеличиться и объем создаваемой и передаваемой производственной информации в обществе, что потребует увеличения производственных мощностей связи и соответствующих инвестиций в инфокоммуникации.

К другим закономерностям развития инфокоммуникаций, применительно к их составляющим относятся:

- корреляционная зависимость между развитием инфокоммуникаций и национальной экономики;
- взаимосвязь между объемом созданной и потребленной информации (т.е. переданной средствами связи) и национальным богатством экономики;

- применение информационно-экономического и логистического законов для моделирования тенденций развития инфокоммуникаций;
- влияние характера потребления и жизненного цикла услуг, макрогенерации и конвергенции на нелинейность развития инфокоммуникаций, обусловленную насыщением рыночного спроса.

С одной стороны, состояние инфокоммуникаций определяется экономическим развитием страны. Согласно закону Джиппа о взаимосвязи ВВП и обеспеченности потребителей средствами связи уровень развития инфокоммуникаций должен соответствовать уровню экономического развития страны. В свою очередь, уровень и темпы развития технологий и услуг зависят от характера научно-технического прогресса, а их внедрение – от уровня экономического развития страны, т.е. объемов инвестирования и платежеспособного спроса потребителей на инфокоммуникационные услуги, рыночного потенциала и жизненного цикла этих услуг. С другой стороны, одной из ведущих тенденций сегодняшнего дня является движение человечества по пути к Глобальному информационному обществу. Эта тенденция основана на фактах бурного роста информационных и телекоммуникационных технологий и их мощных социально-экономических воздействиях на другие сферы экономики и социума.

Литература

1. 25 лет инфокоммуникационной революции (сборник трудов) / Под ред. Л.Е. Варакина. – М.: МАС, 2006. – 264 с.

2. Measuring the Information Society. International Telecommunication Union. Place des Nations. CH-1211. – Geneva, Switzerland, 2014. – 175 p.

3. E-Government for the Future We Want 2014. – New York: United Nations E-Government Survey, 2014.- 284 p. URL: http //www.unpan.org/e-government (дата обращения: 01.10.2015).

4. The Global Competitiveness Report 2013-2014. – New York: World Economic Forum, 2014. – 569 p.

5. Сценарные условия долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года. – М.: Минэкономразвития, 2012. – 61 с.

6. Кузовкова Т. А., Тимошенко Л. С. Анализ и прогнозирование развития инфокоммуникаций. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 224 с.

7. Варакин Л. Е. Цифровой разрыв и его измерение // International Telecommunication Academy. 2004. № 1. С. 9–19. – №2. С.. 3– 11

8. Варакин Л. Е. Информационно-экономический закон. Взаимосвязь инфокоммуникационной инфраструктуры и экономики. – М.: МАС, 2006. – 106 с.

9. Глазьев С. Ю. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования. – М.: Наука, 1992. – 594 с.

10. Варакин Л. Е. Направления развития инфокоммуникаций России на основе современных технологий и мировых тенденций // Труды МАС. 2001. №1 (17). С. 2-12.

11. Концепция развития отрасли «Связь и информатизация» Российской Федерации / Под ред. Л. Д. Реймана и Л. Е. Варакина. – М.: МАС, 2001. – 340 с.

12. Яковец В. И. Ускорение научно-технического прогресса. Теория и экономический механизм. – М.: Экономика, 1988. – 382 с.

13. Инфокоммуникации информационного общества. Книга 1 и 2 / Под ред. Л.Е. Варакина. – М.: МАС, 2006. – 416 с., 544 с.

14. Кузовкова Т. А. Экономические аспекты конвергентного развития инфокоммуникаций // Электросвязь. 2009. № 2. С. 16-19.

15. Кох Р., Яновский Г. Эволюция и конвергенция в электросвязи. – М.: Радио и связь, 2001. – 280 с.

16. Кузовкова Т. А. Индикаторы отраслевого развития в условиях конвергенции связи и информатики // Электросвязь. 2001. № 2. С. 25-28.

17. Васильев В. В., Кузовкова Т. А. Инфокоммуникационные технологии и информациональная экономика. – М.: Издательство «Палеотип», 2005. – 268 с.

18. Кузовкова Т. А., Салютина Т. Ю., Шаравова О. И. Статистика инфокоммуникаций. Учебник для вузов / Под ред. Т. А. Кузовковой. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 554 с.

19. Мардер С. Н. Смена парадигмы телекоммуникаций и семиуровневая модель взаимодействия открытых систем // Электросвязь. 2007. № 2. С. 9–10.

20. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31.01.2014 № 14-ст “ Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД 2) ОК 029-2014 (КДЕС ред.2)”. URL: http:/www.buhgalter@duxprofi.ru (дата обращения: 01.10.2015).

21. Jipp A. Welth of Nations and Telephone Density // Telecommunicztions Journal. 1963. № 6.

22. Census Measures Information Consumption // MPT News. Japan. 1991. № 10.

23. Варакин Л. Е. Теория развития инфокоммуникаций и ее практическое применение: Связь России в XXI веке / Под ред. Л. Е. Варакина. – М.: МАС, 1999. – 396 с.

24. Статистика: учебник / Под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Проспект, 2010. – 448 с.

References

1. *25 let infokommunikatsionnoi revoliutsii*. *Sbornik trudov* [25 Years of Infocommunication Revolution (collected papers)]. Moscow, International Telecommunications Academy, 2006, 264 p (in Russia).

2. Measuring the Information Society. *International Telecommunication Union. Place des Nations*. CH-1211. Geneva, Switzerland, 2014, 175 p.

3. E-Government for the Future We Want 2014. New York, United Nations E-Government Survey, 2014, 284 p. Available at: http //www.unpan.org/e-government (accessed: 1 October 2015).

4. The Global Competitiveness Report 2013-2014. New York, *World Economic Forum*, 2014, 569 p.

5. *Scenario conditions of long-term socio-economic development of the Russian Federation until 2030*. Moscow, Minekonomrazvitiia, 2012, 61 p. (in Russian).

6. 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).

7. Varakin L. E. Tsifrovoi razryv i ego izmerenie [Digital Divide and its Measurement]. *International Telecommunication Academy*, 2004, no. 1, pp. 9-19, no 2, pp. 3-11 (in Russian).

8. 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 Russia).

9. Glaz'ev S. Iu. *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 Russia).

10. Varakin L. E. Napravleniia razvitiia infokommunikatsii Rossii na osnove sovremennykh tekhnologii i mirovykh tendentsii [Directions of Development of Infocommunications of Russia on the Basis of Modern Technologies and Global Trends]. *Works of International Telecommunications Academy,* 2001, no. 1, vol. 17, pp. 2-12 (in Russia).

11. Reiman L. D., Varakin L. E. *Kontseptsiia razvitiia otrasli «Sviaz' i informatizatsiia» Rossiiskoi Federatsii* [The Concept of Development of the Industry "Communication and Information" of the Russian Federation]. Moscow, International Telecommunications Academy Publ., 2001, 340 p (in Russia).

12. Iakovets V. I. *Uskorenie nauchno-tekhnicheskogo progressa. Teoriia i ekonomicheskii mekhanizm* [The Acceleration of Scientific and Technical Progress. Theory and Economic Mechanism]. Moscow, Ekonomika Publ., 1988, 382 p (in Russia).

13. Varakin L. E. *Infokommunikatsii informatsionnogo obshchestva* [Infocommunications of the information society]. Moscow, International Telecommunications Academy Publ., 2006. Vol. 1, 416 p. Vol. 2, 544 p. (in Russia).

14. Kuzovkova T. A. Ekonomicheskie aspekty konvergentnogo razvitiia infokommunikatsii [Economic Aspects Converged Infocommunication Development]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2009, no. 2, pp. 16-19 (in Russia).

15. Kokh R., Ianovskii G. *Evoliutsiia i konvergentsiia v elektrosviazi* [Evolution and Convergence in Telecommunications]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2001, 280 p. (in Russia).

16. Kuzovkova T. A. Indikatory otraslevogo razvitiia v usloviiakh konvergentsii sviazi i informatiki [The Indicators of Sectoral Development in the Context of Convergence of Telecommunications and Informatics]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2001, no. 2, pp. 25-28 (in Russia).

17. Vasil'ev V. V., Kuzovkova T. A. *Infokommunikatsionnye tekhnologii i informatsional'naia ekonomika* [Information and Communication Technology and Informational Economy]. Moscow, Paleotip Publ., 2005, 268 p. (in Russia).

18. Kuzovkova T. A., Saliutina T. Iu., Sharavova O. I. *Statistika infokommunikatsii* [Statistics of Communications]. Moscow, Goriachaia Liniia-Telekom Publ., 2015, 554 p. (in Russian).

19. Marder S. N. Smena paradigmy telekommunikatsii i semiurovnevaia model' vzaimodeistviia otkrytykh system [Paradigm Shift of Telecommunications and Seven-layer Model the Open Systems Interconnection]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2007, no. 2, pp. 9-10 (in Russia).

20. The order of the Federal Agency for technical regulation and Metrology by 31.01.2014 no. 14-ST “All-Russian Classifier of Types of Economic Activity OK 029-2014”. URL: http://docs.cntd.ru/document/499092012 (accessed: 10 October 2015).

21. Jipp A. Welth of Nations and Telephone Density. *Telecommunicztions Journal*, 1963, no 6.

22. Census Measures Information Consumption. *MPT News*, Japan, 1991, no 10.

23. Varakin L. E. *Teoriia razvitiia infokommunikatsii i ee prakticheskoe primenenie: Sviaz' Rossii v XXI veke* [Theory of Development of Telecommunications and its Practical Application: the Connection of Russia in XXI century]. Moscow, International Telecommunications Academy Publ., 1999, 396 p (in Russia).

24. Eliseeva I. I. *Statistika* [Statistics]. Moscow, Prospekt Publ., 2010, 448 p (in Russia).

Статья поступила 18 октября 2015 г.

Информация об авторе

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. E-mail: tkuzovkova@me.com

Адрес: 111024, Россия, г. Москва, Авиамоторная ул., дом 8А.

Evaluation of the Role of Infocommunications in the National Economy and to Identify Patterns of Development

T. A. Kuzovkova

Problem statement: *to dramatically transform, convergence of networks, services, systems and technologies in the field of communication and Informatics, affecting adjacent markets and the domestic economy dictate the need for scientific justification of the transformation of a new sector of the economy, patterns of development in relation to the national economy, causes and factors of formation of the telecommunications industry.* ***The aim*** *is to identify patterns of info communications development as a complex branch of economy and its values, correlations with economic growth, stages of scientific and technological progress, the convergence of communications and Informatics and their consequences, actions, information and economic law, patterns of consumption and macro generation information and communication services for the purpose of formation of the methodological apparatus of forecasting of development of info communications.* ***Methods:*** *the paper found the use of economic-mathematical and statistical methods.* ***Result:*** *to study the factors and regularities of the development of telecommunications allows more objectively and with consideration of many factors to predict its prospects in relation to the national economy.* ***Practical value*** *of work consists in a scientific substantiation of the parameters of forecasting of development of infocommunications.*

Key words: *infocommunications, scientific and technological progress, convergence, patterns.*

Information about Author

Tatiana Alekseevna Kuzovkova – Dr. Habil. of Economic Sciences, Professor. 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. E-mail: tkuzovkova@me.com

Address: Russia, 111024, Moscow, Aviamotornaya str., 8A.

УДК 519.711

Логико-алгебраический подход к моделированию конфликтов

Левин В. И.

Актуальность. *Конфликты присутствуют во всех областях деятельности человека, различные виды конфликтов, однако, все еще рассматриваются исследователями не как различные проявления одного и того же явления, а как различные процессы. В связи с этим сложились различные направления науки о конфликтах, характеризуемые своими подходами, моделями и методами. Однако во всех видах конфликтов есть нечто общее, позволяющее рассматривать их как одно и то же явление, несмотря на имеющиеся между ними различия. Это позволяет применять к изучению разнообразных конфликтов одни и те же подходы, модели и методы, тем самым открывая дорогу созданию единой теории конфликтов.* ***Цель статьи.*** *Целью является описание возможности построения единой теории взаимодействия систем различной природы, где имеется взаимодействие трех видов: конфликт, сотрудничество и нейтралитет. Построение такой теории использует единый подход, единую математическую модель, а также единые математические методы.* ***Метод.*** *Основным методом для достижения поставленной цели является математическое моделирование поведения изучаемых систем с помощью так называемых логических функций состояния. После этого путем совмещения функций состояния двух взаимодействующих систем строятся функция их совпадения и функция их расхождения. По значениям двух последних функций делается общее заключение о характере взаимодействия систем: конфликт, сотрудничество или нейтралитет.* ***Новизна.*** *Новизна состоит в том, что впервые показывается возможность единообразного математического моделирования процессов взаимодействия систем различной природы – социальных, экономических, политических и т.д. – с помощью аппарата алгебры логики.* ***Результат.*** *В статье, с использованием математического аппарата алгебры логики (булевой алгебры), разработан логико-алгебраический метод построения и вычисления функции совпадения и функции расхождения взаимодействующих систем. Составлен алгоритм, позволяющий путем анализа функций совпадения и расхождения взаимодействующих систем дать заключение о характере их взаимодействия – конфликт или сотрудничество.*

Ключевые слова: *конфликт, сотрудничество, нейтральность, алгебра логики, логическое изучение систем.*

Введение

Различные конфликты присутствуют практически во всех областях, с которыми связана деятельность человека: международные отношения, общество, его экономика, социальная сфера, природа, техника. Но различные виды конфликтов до сих пор воспринимаются исследователями не как различные проявления в принципе одного и того же явления, а как существенно разные процессы. В связи с этим современная наука о конфликтах развивается по различным направлениям, связанным отчасти с типами конфликтов, но в большей степени – с полученным образованием и опытом работы исследователя. В наибольшей степени сложилось 2 таких направления – гуманитарное и естественнонаучное. Гуманитарное направление использует традиционные качественные методы гуманитарных наук и зачастую направлено не столько на детальное изучение, сколько на способы практического разрешения психологических, педагогических, медицинских, этнических, юридических, религиозных, политических и иных подобных конфликтов [1]. Естественнонаучное направление использует математические модели и методы,

сходные с используемыми в естественных и точных науках – математике, физике, биологии, кибернетике; оно направлено на детальное количественное изучение конфликтных ситуаций в технических, биологических, физических, информационных и других подобных системах. Отметим также, что непрестанно увеличивается число классов конфликтующих систем, к изучению которых привлекают методы обоих направлений. Таковы, например, социальные, исторические, человеко-машинные, экономические, производственные, управленческие и другие системы. Сюда же относятся и вооруженные конфликты в системах государств и внутри государства.

С конца 1990-х годов на базе естественнонаучного направления начали создаваться различные версии общей теории конфликта, различающиеся базовой концепцией и выбранными математической моделью и математическим аппаратом. Так, существует игровая теория конфликта в форме математической теории игр [2], структурная теория конфликта, построенная на основе структурно-параметрического представления конфликтующих систем [3], вероятностная теория конфликта, в которой степень конфликтности определяется с помощью аппарата теории вероятностей [4], дифференциальная теория конфликта, созданная на базе дифференциального и интегрального исчисления [5].

Известно, что множество классов систем, в частности, конфликтующих между собой систем, можно адекватно описывать в терминах математического аппарата алгебры логики [6–26]. Преимущества логического моделирования систем заключаются в конструктивности аппарата алгебры логики, наличии в нем эффективных вычислительных алгоритмов и легкости интерпретации получаемых с его помощью результатов. Все это делает целесообразным построение логической теории конфликта систем. Настоящая работа – первый шаг на пути построения указанной теории. Она содержит обзор основных результатов автора в данном направлении.

1. Постановка задачи

Для точного формулирования постановки задачи сначала рассмотрим несколько типичных систем различной природы.

1. Рассмотрим некоторую техническую систему, состоящую из основного устройства и n резервных устройств. Система запускается с работоспособным основным устройством, которое выполняет возложенную на систему функцию. При этом все резервные устройства отключены. По выходе основного устройства из строя включается 1-е резервное устройство, которое берет на себя возложенную на систему функцию. Аналогично, по выходе из строя 1-го резервного устройства функцию всей системы берет на себя 2-е резервное устройство и т.д. Пусть состояние основного устройства обозначается через x, где $x=1$, если устройство работоспособно, и $x=0$, если неработоспособно. Аналогично, обозначим состояние i-го резервного устройства $x_i, i=\overline{1,n}$, где $x_i=1$, если i-е устройство работоспособно, $x_i=0$ в противном случае. Далее, пусть состояние системы – величина y, где $y=1$, если система выполняет

возложенную на нее функцию, т.е. работоспособна, и $y=0$, если она не выполняет эту функцию (неработоспособна). Из описания работы следует, что система работоспособна, только если работоспособны основное устройство или хотя бы одно из n ее резервных устройств. Итак, функцию состояния системы $y=f(x,x_1,...,x_n)$, выражающую зависимость состояния y от состояний устройств $x,x_1,...,x_n$ в один и тот же произвольный момент времени, запишем в виде булевой логической функции

$$y=x\vee x_1\vee ...\vee x_n. \qquad (1)$$

Здесь $\vee$ означает логическую операцию булевой дизъюнкции. Булева логическая функция (1) представляет собой одномоментную (статическую) математическую модель функционирования описанной системы: она выражает одномоментное состояние всей системы y в виде суперпозиции логических операций дизъюнкции над состояниями в тот же момент $x,x_1,...,x_n$ всех ее устройств. Эту функцию будем называть функцией состояния системы. Из (1) видно, что $y=1$ только если $x=1$ или $x_1=1$ или ... или $x_n=1$, что полностью соответствует описанному условию работоспособности системы.

2. Рассмотрим экономическую систему, состоящую из n однотипных организаций по обслуживанию клиентов некоторого города (магазинов или банков или ремонтных мастерских и т.д.). Для определенности будем далее рассматривать систему магазинов. Каждый магазин имеет свой индивидуальный перечень предлагаемых товаров (продуктов). Однако множество A всех магазинов нашей системы $A_1,A_2,...,A_n$ должно обладать свойством полноты, в соответствии с которым клиент, посетив все магазины этого множества, гарантированно сможет приобрести все товары (продукты) из некоторого стандартного списка минимально необходимых товаров (продуктов). Кроме того, некоторые подмножества множества всех магазинов системы могут также обладать свойством полноты. Обозначим $x_i, i=\overline{1,n}$, действие клиента в отношении i-го магазина, где $x_i=1$, если клиент посещает этот магазин для покупки некоторой части стандартного списка необходимых товаров, и $x_i=0$, если не посещает. Пусть $\{A_{i_1},A_{i_2},...,A_{i_k}\}$ – некоторое полное подмножество магазинов с номерами $i=i_1,i_2,...,i_k$. Действия клиента в отношении этого подмножества магазинов, рассматриваемого как единое целое, можно описать в виде следующей логической функции $y=f(x_{i_1},...,x_{i_k})$

$$y=x_{i_1}\wedge x_{i_2}\wedge ...\wedge x_{i_k}, \qquad (2)$$

в которой $y=1$, если клиент посещает все магазины подмножества, приобретая при этом все необходимые товары, и $y=0$ – в противном случае, а x_i введены выше. Здесь $\wedge$ означает логическую операцию булевой конъюнкции. Из (2) видно, что $y=1$, только если $x_{i_1}=1$ и $x_{i_2}=1$ и ... и $x_{i_k}=1$, что полностью соответствует описанному условию работы выделенного подмножества магазинов. В дальнейшем знак $\wedge$ булевой конъюнкции для сокращения записи будет опущен. Булеву логическую функцию $y=f(x_{i_1},...,x_{i_k})$ вида (2) естественно

называть частной функцией состояния произвольного клиента при выбранном полном подмножестве магазинов $\{A_{i_1},..., A_{i_k}\}$, поскольку она выражает зависимость состояния клиента, в смысле приобретения (неприобретения) им списка необходимых товаров, от посещения (непосещения) им всех магазинов выбранного полного подмножества магазинов. Однако клиент вправе выбрать для посещения любое полное подмножество имеющегося множества магазинов A (включая само множество A), поскольку все они эквивалентны в смысле возможности приобретения стандартного списка товаров. Отсюда следует, что полная возможность приобретения клиентом стандартного списка товаров во всем имеющемся множестве магазинов A есть теоретико-множественное объединение его частных возможностей приобретения указанного списка товаров в отдельных полных подмножествах множества A. Это означает, что, наряду с частными (2), существует также общая функция состояния произвольного клиента $y = f(x_1,..., x_n)$, выражающая зависимость состояния клиента, в смысле приобретения (неприобретения) им стандартного списка товаров, от посещения (непосещения) всех магазинов хотя бы одного полного подмножества магазинов $\{A_{i_1},..., A_{i_k}\}$ имеющегося множества магазинов $A = \{A_1,..., A_n\}$. Эта функция имеет вид

$$y = \bigvee_{\{i_1,...,i_k\}} (x_{i_1} x_{i_2} ... x_{i_k}). \qquad (3)$$

Дизъюнкция $\vee$ конъюнкций переменных $(x_{i_1},..., x_{i_k})$ в выражении (3) берется по всем наборам номеров магазинов $\{i_i,..., i_k\}$, которым соответствуют полные подмножества магазинов $\{A_{i_1},..., A_{i_k}\}$. Из (3) видно, что $y = 1$ (клиент выкупает весь стандартный перечень товаров), только в случае, если хотя бы для одного набора $\{i_i,..., i_k\}$ имеем $x_{i_1} = 1$, ..., $x_{i_k} = 1$ (т.е. клиент посещает все магазины хотя бы одного полного подмножества $\{A_{i_1},..., A_{i_k}\}$. Данное устройство общей функции состояния клиента системы магазинов соответствует описанным выше условиям функционирования системы. Поэтому булеву функцию (3), имеющую вид дизъюнкции конъюнкций (т.е. дизъюнктивной нормальной формы – ДНФ) можно считать статической математической моделью функционирования системы магазинов. Совершенно аналогично строятся статические математические модели других сходных экономических систем – банков, ремонтных мастерских и т.д.

3. Рассмотрим административную систему – Ученый совет, включающий председателя совета и n членов совета. Для простоты будем считать число n четным. Заседание совета правомочно, только если в нем участвует председатель совета и не менее половины членов. Обозначим состояние совета переменной y, где $y = 1$, если совет правомочен проводить заседание, и $y = 0$ в противном случае. Далее, пусть x_i – состояние i-го члена совета, где $x_i = 1$, если i-й член совета присутствует на заседании совета, и $x_i = 0$, если не присутствует. Аналогично вводим переменную x для обозначения состояния председателя: $x = 1$, если председатель присутствует на заседании совета, и $x = 0$, если не

присутствует. Из описания работы совета следует, что заседание совета правомочно $(y=1)$, только если $x=1$ и существует хотя бы один набор $\{x_{i_1},...,x_{i_{n/2}}\}$ из $n/2$ переменных x_i, где $x_{i_1}=1, ..., x_{i_{n/2}}=1$. Таким образом, функцию состояния системы $y=f(x,x_1,...,x_n\}$, выражающую зависимость состояния системы y от состояния председателя x и состояний рядовых членов $x_1,...,x_n$ в один и тот же произвольный момент времени можно представить в виде следующей булевой логической функции

$$y=x[\bigvee_{\{i_1,...,i_{n/2}\}}(x_{i_1}x_{i_2}...x_{i_{n/2}})]. \quad (4)$$

Дизъюнкция $\vee$ конъюнкций переменных $(x_{i_1},...,x_{i_{n/2}})$ в (4) вычисляется по всем возможным конъюнкциям, включающим каждая по $n/2$ переменных из множества $\{x_1,...,x_n\}$. Число этих конъюнкций

$$N=C_n^{n/2}=\frac{n!}{[(n/2)!]^2}. \quad (5)$$

Булева логическая функция вида (4) является статической математической моделью работы описанной выше административной системы – Ученого совета. Она выражает одномоментное состояние всей системы y в виде суперпозиции логических операций конъюнкции и дизъюнкции над состояниями в тот же момент времени $x,x_1,...,x_n$ элементов системы – председателя и членов Ученого совета. Из выражения (4) видно, что $y=1$, только если $x=1$ и хотя бы для одного набора $\{x_{i_1},...,x_{i_{n/2}}\}$ из $n/2$ переменных x_i выполняется $x_{i_1}=1, ..., x_{i_{n/2}}=1$. Это полностью соответствует описанным выше условиям работы нашей системы.

Из приведенных выше примеров можно заключить, что значительное число систем – технических, экономических, административных и т.д. (подробный список систем см. в [6–14, 17, 22, 24–26]) можно описать математически с помощью логической функции состояния, выражающей мгновенное состояние системы в произвольный момент времени t в виде суперпозиции логических операций над состояниями в этот же момент t элементов системы. Исследование каждой отдельной системы в терминах логической функции ее состояния позволило в свое время построить эффективную логическую теорию систем. С ее помощью можно успешно рассчитывать системы, анализировать и синтезировать их [6–13].

Задача данной работы состоит в том, чтобы распространить построенную логическую теорию отдельных систем на ситуацию взаимодействия систем. Такое распространение должно позволить изучать конфликты между системами как их отрицательное взаимодействие, а сотрудничество между ними – как положительное взаимодействие, используя для изучения тот же самый логический аппарат. В итоге должна быть создана логическая теория конфликта и сотрудничества систем, изучающая данные явления полностью формализованно с помощью математического аппарата алгебры логики. Разрабатываемая теория аналогична логической теории цифровых вычислительных устройств [19] и

имеет все преимущества последней – конструктивность представления изучаемой системы, возможность формализованного проектирования и формализованной минимизации (упрощения) ранее спроектированной системы.

2. Математический аппарат

В качестве математического аппарата теории будем использовать алгебру логики [27], т.е. систему

$$L = (B; f_1, f_2, ...), \quad (6)$$

где $B = \{0,1\}$ – двоичное множество, а $f_1, f_2, ...$ – все возможные операции на множестве B, называемые логическими (булевыми) функциями. В этой алгебре любая n-арная операция f из (6) есть отображение $B^n \to B$, т.е. функция $y = f(x_1,..., x_n)$ от n переменных, где $y, x_1,..., x_n \in B$. Соответственно этому областью определения любой логической функции $y = f(x_1,..., x_n)$ является множество всех n-местных двоичных наборов $(x_1,..., x_n)$ значений аргументов x_i. Эти двоичные наборы имеют вид $(00...0), (00...1),..., (11...1)$, их общее число равно 2^n. Областью значений любой логической функции f с любым набором аргументов x_i является само несущее множество $B = \{0,1\}$.

Наборы $(x_1,..., x_n)$, где $f = 1$, называются единичными, их совокупность образует единичное множество. Наборы $(x_1,..., x_n)$, на которых $f = 0$, являются нулевыми, их совокупность образует нулевое множество.

Введенные только что булевы логические функции практически могут быть заданы 5 способами, которые различны по форме, но эквивалентны по содержанию. Перечислим эти способы.

Табличный способ: логическая функция задается так называемой таблицей истинности. Она имеет 2^n строк по числу наборов значений аргументов $(x_1,..., x_n)$, n столбцов значений аргументов $x_1,..., x_n$ и 1 столбец значений функции y. Каждому набору значений аргументов $(x_1,..., x_n)$ в таблице соответствует свое значение функции y (см. пример табл. 1). В таблице истинности наборы $(x_1,..., x_n)$ идут в лексикографическом порядке, т.е. в порядке возрастания наборов, рассматриваемых как двоичные числа.

Таблица 1 – Табличный способ задания логической функции

x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Графический способ: функция задается n-мерным единичным кубом, вершинам которого соответствуют различные возможные наборы значений аргументов $(x_1,..., x_n)$, которым приписаны соответствующие значения функции

y. Наборы относительно вершин расставляются так, чтобы соседним вершинам соответствовали соседние (т.е. различающиеся одним элементом) наборы. Примеры задания логических функций с помощью графического способа показаны на рис. 1, 2.

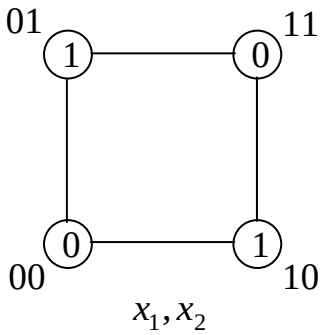


Рис. 1.

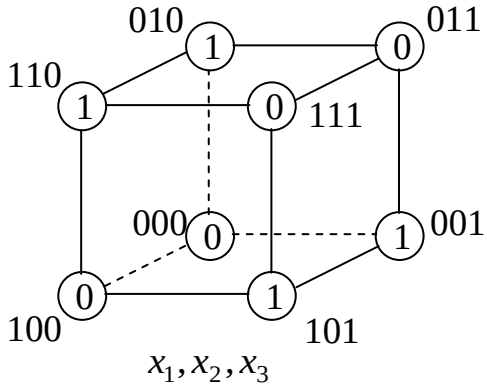


Рис. 2

Координатный способ: логическая функция задается картой Карно, имеющей 2^n клеток – по числу наборов значений аргументов. Каждая клетка определяется координатами строки и столбца. При этом все аргументы разбиваются на 2 группы так, что своими значениями одна группа задает координаты строки, а другая – координаты столбца. В любой клетке проставляется значение функции на данном наборе значений аргументов, состоящем из поднаборов, определяющих координаты строки и столбца, на пересечении которых стоит эта клетка.

Так, клетки называют единичными и нулевыми, в соответствии с проставленными в них значениями функции. Пример карты Карно дан в табл. 2, где представлена некоторая функция 4 переменных x_1, x_2, x_3, x_4. Заметим, что поднаборы x_1, x_2 и x_3, x_4 значений аргументов заданы в табл. 2 так, что соседним строкам и столбцам соответствуют соседние поднаборы.

Таблица 2 – Пример карты Карно

		x_3, x_4			
		00	10	11	01
x_1, x_2	00	1	0	1	1
	10	0	1	1	0
	11	1	0	0	1
	01	1	0	0	1

Числовой способ: булева логическая функция задается здесь множеством десятичных номеров единичных наборов значений аргументов. Так, присвоив двоичным аргументам x_1, x_2 соответственно веса $2^0, 2^1$, получим запись функции (рис. 1) в виде $f = \{1, 2\}_{x_1, x_2}$.

Аналитический способ: функция f задается формулой в виде суперпозиции нескольких более простых функций $f_1, ..., f_m$.

Тот или иной способ задания логических функций выбирается в зависимости от числа аргументов функции и вида решаемой задачи [27].

Выделяют логические функции одного и двух аргументов – так называемые элементарные функции. С помощью суперпозиции полных наборов этих функций можно строить любые логические функции от любого числа аргументов [6, 27]. Будем использовать булев полный набор $\{\vee, \wedge, \bar{\ }\}$, который включает 2-хместные логические функции дизъюнкцию $\vee$ и конъюнкцию $\wedge$ и одноместную функцию отрицание $\bar{\ }$, определяемые так:

$$x_1 \vee x_2 = \begin{cases} 1, \text{при } x_1 = 1 \text{ или } x_2 = 1, \\ 0, \text{при } x_1 = 0 \text{ и } x_2 = 0; \end{cases}$$

$$x_1 \wedge x_2 = \begin{cases} 1, \text{при } x_1 = 1 \text{ и } x_2 = 1, \\ 0, \text{при } x_1 = 0 \text{ или } x_2 = 0; \end{cases} \qquad (7)$$

$$\bar{x} = \begin{cases} 1, \text{при } x = 0, \\ 0, \text{при } x = 1. \end{cases}$$

Дизъюнкция и конъюнкция (7) распространяются на любое число аргументов x_i. Чаще всего для экономии записи знак конъюнкции $\wedge$ опускают и вместо $x_1 \wedge x_2$ пишут $x_1 x_2$. Нам еще потребуются две специальные сложные логические функции F и Φ, конструируемые из двух любых логических функций f_1 и f_2 следующим образом

$$F = \begin{cases} 1, \text{если } f_1 = f_2, \\ 0, \text{если } f_1 \neq f_2; \end{cases} \quad \Phi = \begin{cases} 1, \text{если } f_1 \neq f_2, \\ 0, \text{если } f_1 = f_2. \end{cases} \qquad (8)$$

При этом функцию F назовем функцией совпадения f_1 и f_2, а функцию Φ – функцией несовпадения (расхождения) f_1 и f_2. Из (7), (8) видно, что функции F и Φ можно выразить аналитически через функции f_1 и f_2 с помощью логических операций дизъюнкции, конъюнкции и отрицания (7):

$$F = f_1 f_2 \vee \bar{f}_1 \bar{f}_2, \quad \Phi = f_1 \bar{f}_2 \vee \bar{f}_1 f_2. \qquad (9)$$

Кроме того, из выражений (7), (8) видно, что функции F и Φ взаимно обратны, т.е. каждая равна отрицанию другой

$$F = \overline{\Phi}, \quad \Phi = \overline{F}. \qquad (10)$$

Будем использовать в дальнейшем две числовые характеристики логических функций: 0-норму N_0 и 1-норму N_1. Так, 0-норма логической функции n аргументов $y = f(x_1,..., x_n)$ есть отношение числа ее нулевых наборов к общему числу наборов. 1-нормой функции n аргументов $y = f(x_1,..., x_n)$ называется отношение числа ее единичных наборов к общему числу наборов. Поскольку общее число наборов значений аргументов функции $f(x_1,..., x_n)$ равно сумме чисел ее нулевых и единичных наборов, справедливо равенство

$$N_0 + N_1 = 1. \qquad (11)$$

Для вычисления явной формы функций совпадения F и расхождения Φ можно использовать аналитический метод, работая по такому алгоритму.

Шаг 1. Записать аналитические представления функций f_1, f_2 (или привести эти функции к аналитическому представлению, если оно не было задано, используя общеизвестные методы приведения [27]).

Шаг 2. Подставить полученные на шаге 1 аналитические представления функций f_1, f_2 в формулы (9).

Шаг 3. Найденные начальные аналитические выражения функций F, Φ привести к стандартной форме (дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ), конъюнктивная нормальная форма (КНФ) и т.д.), используя общеизвестные методы приведения [27].

Явную форму функций F и Φ можно найти также табличным методом, используя следующий алгоритм.

Шаг 1. Записать табличное представление функций f_1, f_2 (или привести их к табличному виду, если он не был задан, используя общеизвестные методы приведения к заданному виду [27].

Шаг 2. Получить табличное представление отрицаний функций $\bar{f}_1, \bar{f}_2$, для чего надо в таблицах истинности f_1, f_2 заменить значения $f_1 = 0,\ f_2 = 0$ на значения $f_1 = 1,\ f_2 = 1$ и наоборот.

Шаг 3. Найти табличное представление конъюнкций $f_1 f_2,\ \bar{f}_1 \bar{f}_2,\ f_1 \bar{f}_2,\ \bar{f}_1 f_2$, для чего следует в каждой клетке таблицы с данным набором значений аргументов обеих функций проставить значение 1, если обе функции, входящие в конъюнкцию, равны на этом наборе 1, и 0 в противном случае.

Шаг 4. Получить табличное представление двучленных дизъюнкций, а именно $f_1 f_2 \vee \bar{f}_1 \bar{f}_2$ и $f_1 \bar{f}_2 \vee \bar{f}_1 f_2$, для чего нужно в каждой клетке таблицы с некоторым набором значений аргументов обоих членов проставить значение дизъюнкции 0, если оба члена, входящих в дизъюнкцию, равны на данном наборе 0, и значение дизъюнкции 1, если хотя бы один из членов равен 1.

В результате выполнения шага 4 в соответствии с формулами (9) мы будем иметь табличные представления функций F и Φ.

Для подсчета 1-нормы и 0-нормы любой логической функции проще всего воспользоваться табличным алгоритмом: взять таблицу истинности этой функции, сосчитать в ней числа единичных и нулевых наборов значений аргументов и затем разделить их на общее количество наборов функции. При этом первый результат даст 1-норму, второй – 0-норму. Можно также использовать карту Карно функции; порядок действий при этом аналогичен предыдущему [19]. Еще один, аналитический способ подсчета норм логической функции основан на приведении ее к совершенной ДНФ (СДНФ) или совершенной КНФ (СКНФ). Приравняв каждую конъюнкцию аргументов в СДНФ к 1, найдем соответствующий набор значений аргументов функции; это и будет единичный набор. В итоге получим все единичные наборы; оставшиеся наборы, очевидно, будут нулевыми. Аналогично, приравняв каждую дизъюнкцию аргументов в СКНФ к 0, найдем соответствующий набор значений аргументов функции; это и будет нулевой набор. В итоге получим все нулевые наборы; оставшиеся наборы – единичные. Заметим, что для вычисления 1- и 0-норм

логической функции не обязательно находить сами наборы – нужно лишь найти их число. Это легко установить по виду СДНФ или СКНФ; число коньюнкций в СДНФ есть число единичных наборов, а число дизъюнкций в СКНФ – число нулевых наборов.

3. Метод решения

Изложенный в п. 2 математический аппарат алгебры логики, вместе с хорошо разработанной методологией использования этого аппарата для проектирования цифровых вычислительных устройств [27], позволяют эффективно решить поставленную в п. 1 задачу разработки логико-алгебраической теории взаимодействия двух или нескольких систем.

Пусть есть две произвольные системы A_1 и A_2 одинакового назначения с одним и тем же числом элементов n, статическая математическая модель работы которых задается логическими функциями состояния $y = f_1(x_1,..., x_n)$ и $y = f_2(x_1,..., x_n)$. Эти функции представляют собой статические математические модели систем (п. 1), выражая одномоментное состояние системы y в виде суперпозиции операций дизъюнкции, конъюнкции и отрицания над состояниями в тот же момент времени $x_1,..., x_n$ элементов системы.

На основе двух систем A_1 и A_2 с функциями состояния f_1 и f_2 построим теперь две новые системы. Функция состояния f_c первой системы A_c определяется как функция совпадения F функций состояния f_1 и f_2 заданных систем. Систему A_c назовем системой совпадения заданных систем A_1 и A_2. Ее функция состояния

$$f_c = F(f_1, f_2) \tag{12}$$

и может быть вычислена через известные функции состояния f_1, f_2 заданных систем A_1, A_2 по (9). Функция состояния f_p второй системы A_p определяется как функция расхождения Φ функций состояния f_1, f_2 заданных систем. Систему A_p назовем системой расхождения заданных систем A_1 и A_2. Ее функция состояния f_p, согласно сказанному, равна

$$f_p = \Phi(f_1, f_2) \tag{13}$$

и может быть также найдена по уже известным функциям состояния f_1, f_2 заданных систем A_1, A_2 с использованием формулы (9). Основные практически полезные свойства, которыми обладают системы совпадения и расхождения можно сформулировать в следующем виде.

1. Система совпадения A_c систем A_1, A_2 находится в состоянии 1 тогда и только тогда, когда A_1 и A_2 находятся в одинаковых состояниях: 0 или 1. Другими словами, функция состояния f_c системы совпадения A_c равна 1 в тех и только тех случаях, когда функции состояния f_1, f_2 систем A_1 и A_2 принимают равные значения: $f_1 = f_2 = 1$ или $f_1 = f_2 = 0$.

2. Система расхождения A_p систем A_1, A_2 находится в состоянии 1 в тех и только тех случаях, при которых системы A_1 и A_2 находятся в различных состояниях: A_1 – в состоянии 1, A_2 – в состоянии 0 или наоборот. Иными словами, функция состояния f_p системы расхождения A_p равна 1 в тех и только тех случаях, когда функции состояния f_1 и f_2 систем A_1, A_2 принимают противоположные значения: $f_1 = 1,\ f_2 = 0$ или $f_1 = 0,\ f_2 = 1$.

Эти свойства позволяют сводить изучение отношений двух систем (сотрудничества или конфликта) к изучению свойств одной системы, а именно, системы совпадения исходных систем или системы их расхождения.

Пусть доля всех наборов аргументов $(x_1,..., x_n)$, на которых функции состояния $f_1(x_1,..., x_n)$ и $f_2(x_1,..., x_n)$ двух рассматриваемых систем A_1 и A_2 принимают различные значения, равна q. Тогда доля всех наборов аргументов, на которых эти функции принимают одинаковые значения, равна $r = 1 - q$. Введем пороговое значение q^* величины q, достаточно близкое к 1 (например, $q^* = 0{,}7$ или 0,8 или 0,9 и т.д.) и аналогичное пороговое значение r^* величины r. Будем говорить, что системы A_1 и A_2 находятся в отношении конфликта, если значение показателя q удовлетворяет условию

$$q > q^*, \tag{14}$$

и что системы A_1 и A_2 находятся в отношении сотрудничества, если фактическое значение показателя r удовлетворяет условию

$$r = 1 - q > r^*. \tag{15}$$

Таким образом, две системы считаются по определению конфликтующими, если доля случаев q, для которых эти системы находятся в противоположных состояниях (одна в состоянии 1, другая в состоянии 0), превышает пороговое значение q^*, близкое к единице.

Аналогично, две системы считаются по определению находящимися в состоянии сотрудничества, если доля случаев r, для которых эти системы находятся в одинаковых состояниях (обе в состоянии 1 или в состоянии 0), больше порогового значения r^*, близкого к единице.

Понятия конфликта и сотрудничества систем, введенные выше, можно обобщить следующим образом. Пусть q – доля всех наборов аргументов, на которых логические функции состояния f_1, f_2 двух систем A_1, A_2 принимают различные (противоположные) значения, а $r = 1 - q$ – доля наборов, на которых эти функции принимают одинаковые значения. Тогда можно говорить, что рассматриваемые системы A_1 и A_2 в степени q находятся в состоянии конфликта и в степени $r = 1 - q$ – в состоянии сотрудничества.

Введенное таким образом общее определение конфликта и сотрудничества систем отличается от предыдущего не только количественно – в нем нет количественных требований к параметрам систем q и r, но и качественно, поскольку здесь системы могут одновременно конфликтовать и сотрудничать.

Если параметры q и r удовлетворяют требованиям (14) и (15), данное общее определение переходит в предыдущее.

Теперь, наконец, мы можем дать общий, полностью формализованный метод вычисления с помощью введенного логико-алгебраического аппарата показателей конфликта и сотрудничества различных систем. Алгоритм указанного метода состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Для двух заданных систем A_1, A_2, имеющих логические функции состояния f_1, f_2, строим систему совпадения A_c. Построение заключается в вычислении функции состояния $f_c = F(f_1, f_2)$ системы A_c путем использования аналитического или табличного алгоритмов, изложенных в п. 2 настоящей статьи.

Шаг 2. Находим 1-норму N_1^c функции состояния f_c системы совпадения A_c двух заданных систем A_1, A_2. Для этого используем соответствующий табличный или аналитический алгоритмы, изложенные в п. 2. Согласно вышесказанному, вычисленное значение N_1^c равно доле случаев r (доле от числа всех наборов аргументов), в которых функции состояния f_1, f_2 рассматриваемых систем A_1, A_2 принимают одинаковые значения.

Шаг 3. Назначаем пороговое значение r^* параметра r, близкое к 1, при этом, если $r > r^*$, объявляем системы A_1, A_2 находящимися в отношении сотрудничества. Если же $r < 1 - r^*$, то объявляем системы A_1, A_2 находящимися в отношении конфликта. Если же $1 - r^* \le r \le r^*$, то объявляем системы A_1, A_2 нейтральными друг к другу.

Шаг 4 (используется вместо шага 3 при более широком понимании конфликта и сотрудничества систем). Объявляем системы A_1 и A_2 находящимися одновременно в отношении сотрудничества на величину показателя r и в отношении конфликта на величину показателя $q = 1 - r$.

Можно построить алгоритм анализа отношения двух систем A_1, A_2 с логическими функциями состояния соответственно f_1, f_2 на базе системы расхождения A_p этих систем. Данный алгоритм строится путем вычисления логической функции состояния $f_p = \Phi(f_1, f_2)$ системы A_p с помощью аналитического или табличного алгоритмов, изложенных в п. 2. Такой алгоритм анализа содержит те же 4 шага, что и предыдущий, и отличается лишь тем, что вычисляемая в нем на втором шаге 1-норма N_1^p функции состояния f_p показывает долю случаев q (долю от числа всех наборов аргументов), в которых функции состояния f_1, f_2 рассматриваемых систем A_1, A_2 имеют различные (противоположные) значения. Показатель q связан с показателем r, по которому анализировалось отношение систем A_1, A_2 в предыдущем алгоритме, формулой $q = 1 - r$.

Пример. Для приема вступительных экзаменов в некотором университете создано три комиссии из 4 человек каждая. Комиссия A_1 решает судьбу экзаменуемого большинством голосов. В случае равного числа голосов «ЗА» и «ПРОТИВ» большинство определяется голосом председателя. Приемная комиссия A_2 принимает положительное решение простым большинством голосов, когда председатель не обладает никаким преимуществом, так что в этом случае для принятия положительного решения экзаменуемый должен получить не менее 3 голосов «ЗА». Комиссия A_3 принимает решение модифицированным большинством голосов: в дополнение к правилу простого большинства голосов, ситуация равного числа голосов «ЗА» и «ПРОТИВ» трактуется в пользу экзаменуемого. Требуется установить отношения между тремя комиссиями в терминах «конфликт–сотрудничество».

Решение. Шаг 1. Вычисленные в соответствии с условиями задачи логические функции состояния f_1, f_2, f_3 систем A_1, A_2, A_3 даны в таблице 3. В этой таблице x_1, x_2, x_3 – состояния членов комиссии, x_4 – состояние председателя ($x_i = 1$ – голосование «ЗА», $x_i = 0$ – «ПРОТИВ»), f_1, f_2, f_3 – состояния комиссии ($f_i = 1$ – итог голосования – «ЗА», $f_i = 0$ – «ПРОТИВ»).

Строим системы совпадения $A_c^{1,2}, A_c^{1,3}, A_c^{2,3}$ для пар систем $A_1, A_2; A_1, A_3; A_2, A_3$, для чего с помощью табличного алгоритма из п. 1 вычисляем логические функции состояния $f_c^{1,2}, f_c^{1,3}, f_c^{2,3}$ этих систем совпадения. Эти функции состояния также показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Значения функций состояния

x_1	x_2	x_3	x_4	f_1	f_2	f_3	$f_c^{1,2}$	$f_c^{1,3}$	$f_c^{2,3}$	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1	f_2	f_3	$f_c^{1,2}$	$f_c^{1,3}$	$f_c^{2,3}$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Шаг 2. Найдем 1-нормы $N_1^{1,2}, N_1^{1,3}, N_1^{2,3}$ функций состояния $f_c^{1,2}, f_c^{1,3}, f_c^{2,3}$, используя соответствующий табличный алгоритм из п. 1. Найденные нормы дают нам следующие значения параметра $r^{i,j}$ – доли случаев, где функции состояния f_i, f_j систем A_i, A_j принимают одинаковые значения

$$N_1^{1,2} = r^{1,2} = 0{,}81, \quad N_1^{1,3} = r^{1,3} = 0{,}81, \quad N_1^{2,3} = r^{2,3} = 0{,}63.$$

Шаг 3. Выбираем пороговое значение r^* параметра r, равное $r^* = 0{,}8$, тогда, поскольку $r^{1,2} > r^*$ и $r^{1,3} > r^*$, а $1 - r^* \le r^{2,3} \le r^*$, то пары систем $(1, 2)$ и $(1, 3)$ надо

считать находящимися в отношении сотрудничества, а пару $(2,3)$ – находящейся в нейтральном отношении.

Шаг 4. При более широком понимании конфликтов и сотрудничества систем мы можем объявить пару систем $(1,2)$ находящейся на $r^{1,2}=0{,}81$ в отношении сотрудничества и на $q^{1,2}=1-r^{1,2}=0{,}19$ в отношении конфликта. Так же, пару систем $(1,3)$ можно объявить находящейся на $r^{1,3}=0{,}81$ в отношении сотрудничества и на $q^{1,3}=1-r^{1,3}=0{,}19$ в отношении конфликта, а пару систем $(2,3)$ находящейся на $r^{2,3}=0{,}63$ в отношении сотрудничества и на $q^{2,3}=1-r^{2,3}=0{,}37$ в отношении конфликта.

Отношения сотрудничества, конфликта и нейтральности между системами, которыми в нашем случае являются различные комиссии по приему абитуриентов, нужно понимать соответственно как возможность, невозможность и проблематичность совмещения результатов работы этих комиссий.

Заключение

В работе показано, что различные возможные отношения – конфликт, сотрудничество и нейтральность – между системами различной природы, описываемыми по отдельности с помощью аппарата алгебры логики, можно успешно изучать с помощью этого же аппарата. Преимущество логико-алгебраического подхода к изучению отношений между системами проявляется в том же самом, что и при использовании этого подхода к изучению отдельных систем, а именно, в конструктивности аппарата алгебры логики, наличии в нем эффективных алгоритмов вычислений и легкости интерпретации получаемых с его помощью результатов.

Литература

1. Фишер Р., Юрии У. Путь к согласию или переговоры без поражения. М.: Наука, 1992. 158 с.

2. Нейман Дж., Моргенштерн О. Математическая теория игр. – М.: Наука, 1970. 707 с.

3. Сысоев В. В. Конфликт. Сотрудничество. Независимость. Системное взаимодействие в структурно-параметрическом представлении. М.: Изд-во Московской академии экономики и права, 1999. 151 с.

4. Светлов В. А. Аналитика конфликта. СПб.: Росток, 2001. 511 с.

5. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.

6. Левин В. И. Математическое моделирование социально-экономических процессов (автоматно-логические методы и модели). Пенза: Изд-во Пензенского технологического ин-та, 1997. 37 с.

7. Левин В. И. Теория автоматов и моделирование сложных систем. Пенза: Изд-во Пензенского гос. технического ун-та, 1995. 68 с.

8. Левин В. И. Автоматное моделирование в социологии: анализ группового поведения // Гуманитарные науки и современность. Вып. 1. Часть 2. Пенза: Изд-во Пензенского гос. технического ун-та, 1995. С. 151–156.

9. Левин В. И. Автоматные модели и методы в политологии: анализ поведения политических систем // Гуманитарные науки и современность. Вып. 2. Пенза: Изд-во Пензенского гос. технического ун-та, 1996. С. 113–128.

10. Левин В. И. Динамический автомат как модель динамического поведения социальных групп // Гуманитарные науки и современность. Вып. 3. Пенза: Изд-во Пензенского гос. технического ун-та, 1997. С. 227–244.

11. Левин В. И. Математическое моделирование систем с помощью динамических автоматов // Информационные технологии, 1997. № 9. С. 15–24.

12. Левин В. И. Математическое моделирование систем с помощью автоматов // Вестник Тамбовского ун-та. Серия: Естественные и технические науки, 1997. Т. 2. № 2. С. 63–72.

13. Левин В. И. Анализ социальных групп с помощью автоматной модели // Гуманитарные науки и современность. Вып. 4. Пенза: Изд-во Пензенского государственного технического ун-та, 1998. С. 9–16.

14. Левин В. И. Автоматная модель определения возможного времени проведения коллективных мероприятий // Известия РАН. Теория и системы управления, 1999. № 3. С. 85–96.

15. Левин В. И. Математическое моделирование Библии. Характеристический автоматный подход // Вестник Тамбовского ун-та. Серия: Естественные и технические науки, 1999. Т. 4. № 3. С. 353–363.

16. Левин В. И. Автоматное моделирование коллективных мероприятий // Автоматика и телемеханика, 1999. № 12. С. 78–89.

17. Левин В. И. Математическое моделирование потока исторических событий методами теории автоматов // Гуманитарные науки и современность. Вып. 5. Пенза: Изд-во Пензенского гос. техн. ун-та, 1999. С. 147–160.

18. Левин В. И. Математическое моделирование Библии. Характеристический подход // Гуманитарные науки и современность. Вып. 5. Пенза: Изд-во Пензенского гос. технического ун-та, 1999. С. 76–87.

19. Левин В. И. Введение в математическую библеистику. – Пенза: Изд-во Пензенского технологического ин-та, 1999. 30 с.

20. Левин В. И. Математическое моделирование библейской легенды о Вавилонском столпотворении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 2001. Т. 6. № 2. С. 123–138.

21. Левин В. И. Математическое моделирование библейской истории о Вавилонском столпотворении и рассеянии народов // Внерациональные формы постижения бытия. – Ульяновск: Изд-во Ульяновского гос. технического ун-та, 2001, С. 62–74.

22. Левин В. И. Моделирование процессов образования коллектива из индивидуумов // Математическая морфология, 2001. Т. 3. № 3. С. 148–161.

23. Левин В. И. Математическое моделирование библейских событий // Наука, религия, общество, 2002. № 3. С. 56–64.

24. Левин В. И. Автоматное моделирование исторических процессов на примере войн // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2002. № 12. С. 93–101.

25. Левин В. И. Автоматное моделирование процессов возникновения и распада коллектива // Кибернетика и системный анализ, 2003. № 3. С. 92–101.

26. Левин В. И. Логико-математическое моделирование занятости // Импликативная алгебра выбора и непрерывная логика в прикладных задачах науки и техники. Труды Международной конференции «Континуальные алгебраические логики, исчисления и нейроматематика в науке, технике и экономике». Т. 2. – Ульяновск: Изд-во Ульяновского государственного технического ун-та, 2002. С. 45–51.

27. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. – М.: Энергия, 1974. – 368 с.

References

1. Roger F., Ury W., Patton B. *Getting to Yes: Negotiating Agreement Without Giving In*. Harvard Negotiation Project, 1991. 158 p.

2. Von Neumann J., Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. Oxford UP, 1953.

3. Sysoev V. V. *Konflikt. Sotrudnichestvo. Nezavisimost'. Sistemnoe vzaimodeistvie v strukturno-parametricheskom predstavlenii* [Conflict. Cooperation. Independence. System interaction in structural-Parametric Representation]. Moscow, Moskovskaia akademiia ekonomiki i prava Publ., 1999, 151 p. (in Russian).

4. Svetlov V. A. *Analitika konflikta* [Analyst Conflict]. Saint-Petersburg, Rostok Publ., 2001, 511 p. (in Russian).

5. Druzhinin V. V., Kontorov D. S., Kontorov M. D. *Vvedenie v teoriiu konflikta* [Introduction to the Theory of Conflict]. Moscow, Radio i Sviaz Publ., 1989, 288 p. (in Russian).

6. Levin V. I. *Matematicheskoe modelirovanie sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov (avtomatno-logicheskie metody i modeli)* [Mathematical modeling of socio-economic processes (automata-logical methods and models)]. Penza, Penza State University Publ., 1997, 37 p. (in Russian).

7. Levin V. I. *Teoriia avtomatov i modelirovanie slozhnykh system* [Theory of Automata and Modeling of Complex Systems]. Penza, Penza state University Publ., 1995, 68 p. (in Russian).

8. Levin V. I. Avtomatnoe modelirovanie v sotsiologii: analiz gruppovogo povedeniia [Automata-Based Simulation in Sociology: Analysis of Group Behaviour]. *Gumanitarnye nauki i sovremennost'* [Humanities and Modernity], 1995, vol. 1, part 2, pp. 151-156 (in Russian).

9. Levin V. I. Avtomatnye modeli i metody v politologii: analiz povedeniia politicheskikh system [Automata Models and Methods in Political Science: Analysis of Behavior of Political Systems]. *Gumanitarnye nauki i sovremennost'* [Humanities and Modernity], 1996, vol. 2, pp. 113-128 (in Russian).

10. Levin V. I. Dinamicheskii avtomat kak model' dinamicheskogo povedeniia sotsial'nykh grupp [Dynamic Machine as a Model of the Dynamic Behavior of Social

Groups]. *Gumanitarnye nauki i sovremennost'* [Humanities and Modernity], 1997, vol. 3, pp. 227-244 (in Russian).

11. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie sistem s pomoshch'iu dinamicheskikh avtomatov [Mathematical modeling of systems with dynamic machines]. *Information Technologies*, 1997, no. 9, pp. 15-24 (in Russian).

12. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie sistem s pomoshch'iu avtomatov [Mathematical Modeling of Systems by Means of Automata]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University. Natural and technical Sciences], 1997, vol. 2, no. 2, pp. 63-72 (in Russian).

13. Levin V. I. Analiz sotsial'nykh grupp s pomoshch'iu avtomatnoi modeli [The Analysis of Social Groups Using Automata Models]. *Gumanitarnye nauki i sovremennost'* [Humanities and Modernity], 1998, vol. 4, pp. 9-16 (in Russian).

14. Levin V. I. An Automaton Model of Finding a Possible Time Interval for Collective Activities. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1999, vol. 38, no. 3, pp. 464-469 (in Russian).

15. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie Biblii. Kharakteristicheskii avtomatnyi podkhod [Mathematical Modeling of the Bible. Characteristic of Automata-Based Approach]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University. Natural and technical Sciences], 1999, vol. 4, no. 3, pp. 353-363 (in Russian).

16. LevinV. I. Automaton Modeling of Collective Procedures. *Automation and Remote Control*, 1999, vol. 60, no. 12, pp. 1791-1796 (in Russian).

17. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie potoka istoricheskikh sobytii metodami teorii avtomatov [Mathematical Modeling of the Flow of Historical Events Using the Theory of Automata]. *Gumanitarnye nauki i sovremennost'* [Humanities and Modernity], 1999, vol. 5, pp. 147-160 (in Russian).

18. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie Biblii. Kharakteristicheskii podkhod [Mathematical Modeling of the Bible. The Characteristic Approach]. *Gumanitarnye nauki i sovremennost'* [Humanities and Modernity], 1999, vol. 5, pp. 76-87 (in Russian).

19. Levin V. I. *Vvedenie v matematicheskuiu bibleistiku* [Introduction to Mathematical Biblical Studies]. Penza, Penza State University Publ., 1999, 30 p. (in Russian).

20. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie bibleiskoi legendy o Vavilonskom stolpotvorenii [Mathematical Modeling of the Bible Legend about Babel]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University. Natural and technical Sciences], 2001, vol. 6, no. 2, pp. 123-138 (in Russian).

21. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie bibleiskoi istorii o Vavilonskom stolpotvorenii i rasseianii narodov [Mathematical Modeling Biblical Stories about Babel and The Scattering of The Peoples]. *Vneratsional'nye formy postizheniia bytiia* [Non-Rational Forms of Comprehension of Life], 2001, pp. 62-74 (in Russian).

22. Levin V. I. Modelirovanie protsessov obrazovaniia kollektiva iz individuumov [Modeling of The Processes of Formation of Collective of

Individuals]. *Matematicheskaia morfologiia* [Mathematical Morphology], 2001, vol. 3, no. 3, pp. 148-161 (in Russian).

23. Levin V. I. Matematicheskoe modelirovanie bibleiskikh sobytii [Mathematical Modeling of Biblical Events]. *Science, Religion, Society*, 2002, no. 3, pp. 56-64 (in Russian).

24. Levin V. I. Avtomatnoe modelirovanie istoricheskikh protsessov na primere voin [Automata Modeling of Historical Processes on The Example of Wars]. *Radioelektronika. Informatika. Upravlenie*, 2002, no. 3, pp. 93–101 (in Russian).

25. Levin V. I. Automaton Modeling of Processes of Formation and Splitting of Collectives. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 394-401 (in Russian).

26. Levin V. I. Logiko-matematicheskoe modelirovanie zaniatosti [Logical-mathematical modelling of employment]. *Implikativnaia algebra vybora i nepreryvnaia logika v prikladnykh zadachakh nauki i tekhniki. Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Kontinual'nye algebraicheskie logiki, ischisleniia i neiromatematika v nauke, tekhnike i ekonomike»"* [Implicative algebra of continuous choice and logic in many applied problems of science and technology. Proc. of the International conference "Continual algebraic logics, calculi and neuromathematics in science, technology and the economy"]. Ul'ianovsk, 2002, vol. 2, pp. 45–51 (in Russian).

27. Pospelov D. A. *Logicheskie metody analiza i sinteza skhem* [Logical methods of analysis and synthesis schemes]. Moscow, Energiia Publ, 1974. 368 p. (in Russian).

Статья поступила 21 октября 2015 г.

Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, Ph.D., 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.

Logical-Algebraic Approach to Conflicts Modeling

V. I. Levin

Relevance. *Conflicts are present in all areas of human activity. However, different types of conflicts are still considered by researchers as different manifestations of the same phenomenon, and not as a different processes. In this regard, areas of the science of conflict are developed and characterized their approaches, models and methods. At the same time in all kinds of conflicts there is something common which allows us to consider all of conflicts as one phenomenon with their differences. It allows us to apply same approaches to the study of various conflicts, models and methods. This is opening the way for the creation of a unified theory of conflict.* ***The purpose.*** *The aim of the article is the description of the possibility of building a unified theory of interaction of systems of different nature, where the interaction of 3 types presents: conflict, cooperation, neutrality. When we constructed this theory we used a common approach, common mathematical model and common mathematical methods.* ***Method.*** *The primary method to achieve the goal is mathematical modeling of the behavior of the studied systems using logic functions of state. After that, by combining the functions of state of two interacting systems the functions of their similarities and differences are built. From the values of last two features we make a general conclusion about the nature of the interaction systems: conflict, cooperation or neutrality.* ***Novelty.*** *The novelty of the paper is that it shows for the first time the possibility of a uniform mathematical modeling of the interaction of various systems (social, economic, political, etc.) by the apparatus of the logic algebra.* ***Result****. In the article, using the mathematical apparatus of the Boolean algebra, we developed logical-algebraic method of constructing and evaluating the functions of convergence and divergence of interacting systems. An algorithm that allows to give an opinion on type of interaction (conflict or cooperation) by analyzing similarities and differences of functions of interacting systems.*

Keywords: *conflict, cooperation, neutrality, logic algebra, logical investigations of the systems.*

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.

УДК 623.385.6

Постановка задачи на разработку модели функционирования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления объединения в период непосредственной угрозы агрессии

Семенов С. С., Алисевич Е. А., Педан А. В., Смолеха А. В.

Описана модель функционирования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) объединения в период непосредственной угрозы агрессии, ее основные элементы и взаимосвязи между ними, процессы, протекающие в ней при восполнении техники связи, вышедшей из строя по причине воздействия различных факторов. Перспективным и опирающимся на современную мировую практику направлением дальнейшего совершенствования системы ТОС и АСУ является применение технологий радиочастотной идентификации и телеметрии за счет определения координат техники и имущества связи в динамике их перемещений в реальном масштабе времени или близком к реальному, а также использование информации о местоположении техники и имущества связи для оптимизации путей доставки с целью сокращения времени выполнения мероприятий системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления в объединении. Актуальность рассматриваемого вопроса позволила сформулировать ***цель исследования*** *– повышение эффективности функционирования системы ТОС и АСУ объединения. Основным* ***результатом*** *работы явилось: выделены (и классифицированы в группы) факторы, которые воздействуют на функционирование системы ТОС и АСУ в объединении в период непосредственной угрозы агрессии; определены параметры, характеризующие моделируемую сложную организационно-техническую систему – систему ТОС и АСУ, а также рассмотрена деятельность специалистов подразделений технического обеспечения, имеющих определенную квалификацию и распределенных по различным уровням иерархии исследуемой системы.* ***Научная новизна*** *вышеуказанного направления работы заключается в разработке научно-методического обеспечения по учету техники и имущества связи с применением технологий радиочастотной идентификации и телеметрии.* ***Практическая значимость*** *направления работы заключается в возможности применения технических предложений должностными лицами в процессе учета техники связи на основе технологии радиочастотной идентификации в системе технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления.*

Ключевые слова: *система технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления, техника связи, технологии радиочастотной идентификации и телеметрии.*

Введение

В условиях постоянно ужесточающихся требований, предъявляемых системой связи к системе технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) по обеспечению высокой боевой готовности элементов и системы ТОС и АСУ в целом; по способности функционировать в условиях воздействия поражающих факторов всех видов оружия противника; по способности в установленные сроки развертываться, свертываться, изменять структуру в соответствии с обстановкой и по производственной мощности актуальной является задача повышения эффективности функционирования системы ТОС и АСУ с целью выполнения вышеуказанных требований. В то же время система технического обеспечения связи и АСУ является сложной организационно-технической

системой, функционирование и поведение которой зависит от воздействия многих случайных факторов.

Анализ характеристик существующей системы ТОС и АСУ в современных условиях с учетом основных особенностей функционирования её элементов показал, что наличие стохастических связей, неполнота и не детерминированность исходной информации, непредсказуемость воздействий оружия функционального поражения, информационных атак и др., невозможность проведения натурного эксперимента для изучения ее функционирования в период непосредственной угрозы агрессии и другие факторы вызывают затруднения в исследовании структуры системы ТОС и АСУ.

Таким образом, для исследования системы ТОС и АСУ актуальным становится применение такого метода моделирования, как имитационное моделирование. Данный метод позволит представить поведение элементов сложной системы и описать процесс восполнения поврежденной техники связи во времени, а также проанализировать различные алгоритмы управления им на модели.

Перспективным и опирающимся на современную мировую практику [1] направлением дальнейшего совершенствования системы ТОС и АСУ является применение технологий радиочастотной идентификации и телеметрии. Определения топологических координат техники и имущества связи в динамике их перемещений в масштабе времени близком к реальному, а также использование информации о ее состоянии позволит оптимизировать пути доставки и сократить время на выполнение мероприятий технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления в объединении и восполнения потерь.

Моделирование объекта исследования (сложной системы) – системы ТОС и АСУ – начинается с постановки задачи на моделирование [2].

В качестве предмета моделирования выступает процесс восполнения вышедшей из строя техники связи объединения в период непосредственной угрозы агрессии, а также деятельность специалистов подразделений технического обеспечения, имеющих определенную квалификацию и распределенных по различным уровням иерархии исследуемой системы. Последовательность функционирования органов системы ТОС и АСУ представляется как процесс обслуживания заявок, поступающих от системы связи [3].

На элементы системы ТОС и АСУ объединения в период непосредственной угрозы агрессии следует ожидать воздействия многих факторов. Среди них можно выделить три основные группы.

1) Неуправляемые факторы: поражающие воздействия; объективно существующие характеристики сил и средств системы ТОС и АСУ; физико-географические условия и т.п.
2) Вероятностные факторы: количество, трудоемкость, распределение степени поврежденности техники связи; влияние оружия функционального поражения, информационные атаки и др. на войска и

элементы системы связи объединения.

3) Регулируемые факторы: период проведения мероприятий ТОС и АСУ, поиск ближайшего резервного образца техники связи (с учетом выполнения требований по резервированию техники связи), его доставка по рассчитанному маршруту – S_z за время – $t_{z\ дост.}$; перераспределение специалистов технического обеспечения и должностных лиц органов управления ТОС и АСУ в ходе функционирования системы.

Для учета этих факторов при построении модели определены параметры, характеризующие: структуру моделируемой системы; численность и распределение специалистов органов управления системы ТОС и АСУ по уровням иерархии; динамику поведения органов в различных ситуациях; характеристики условий эксплуатации техники связи в период непосредственной угрозы агрессии.

Первая группа параметров позволяет учесть как i-е вертикальные уровни иерархии войск, так и горизонтальное разбиение техники связи по формированиям войск и элементам системы связи объединения m_i. Модель представляется в виде системы массового обслуживания, имеющей трехуровневую структуру. Выбор такого количества иерархических уровней определяется различием в объемах и характере мероприятий по поддержанию требуемых качественных характеристик техники связи в различные периоды функционирования органов ТОС и АСУ.

На первом уровне происходит обслуживание заявок силами экипажей и подразделений технического обеспечения частей с использованием ресурса центра материально-технического обеспечения. Необслуженные заявки предполагается удовлетворять за счет специалистов органов ТОС и АСУ второго уровня системы.

Второй уровень предназначен для оказания помощи экипажам и подразделениям ТОС и АСУ первого уровня при превышении допустимой загрузки личного состава, за счет централизации ресурса подразделений технического обеспечения соединений и частей, непосредственно подчиненных данному уровню иерархии системы. При отказе в обслуживании, возникающем на втором уровне, функции восполнения выхода техники связи из строя возлагаются на третий уровень.

На третьем уровне происходит обслуживание заявок, которые не в состоянии обеспечить на первом и втором уровнях. Количество ресурсов данного звена управления, необходимое для проведения всего комплекса мероприятий технического обеспечения, определяется составом войск объединения, системой связи и требованиями по укомплектованности работоспособной техникой связи. В модели учитывается, что техника, требующая капитального ремонта, восполняется за счет ресурсов органов снабжения и довольствующего органа. При этом предполагается, что заявки, поступающие от третьего уровня, будут частично удовлетворяться.

Поток событий в рассматриваемой системе в общем случае принимается неоднородным ввиду его принадлежности к различным источникам заявок,

приоритетов, возможностей обслуживания различных уровней иерархии. Так на первом уровне системы все заявки обслуживаются без учета приоритетов в порядке поступления. При возникновении отказа на обслуживание на первом уровне заявки поступают на второй уровень, который производит их обработку через определенный интервал времени. Основная масса отказов элементов второго уровня возникает по тем же причинам, что и в первом. Аналогично происходит обслуживание на третьем уровне, за исключением того, что отказы на данном уровне происходят в том случае, когда время пребывания в очереди на обслуживание превышает величину, в течение которого образец техники связи должен быть приведен в работоспособное состояние или восполнен за счет доставки резервного по рассчитанному маршруту (S_z) за время ($t_{z\ дост.}$).

С целью учета особенностей технического обеспечения и характеристик техники связи, определения квалификации специалистов подразделений ТОС и АСУ при проведении мероприятий технического обеспечения, вся совокупность техники связи разбивается на z групп. Выбор состава и содержания групп определяется в соответствии с [4] и, следовательно, обуславливает квалификацию специалистов подразделений ТОС и АСУ. При формировании модели учитываются следующие группы техники связи и автоматизированных систем управления:

1) станции космической связи (СКС);
2) радиостанции большой и средней мощности;
3) радиостанции малой мощности;
4) многоканальные тропосферные и радиорелейные станции;
5) малоканальные тропосферные и радиорелейные станции;
6) аппаратные (аппаратура) уплотнения;
7) радиоприемные узлы, аппаратные дистанционного управления, частотно-диспетчерской службы;
8) командно-штабные машины, машины автоматизированного управления;
9) специальная аппаратура (аппаратные) засекречивания (телеграфная, телефонная, фототелеграфная, передачи данных);
10) автоматические телефонные станции, телефонные и телеграфные аппаратные, кроссовые аппаратные;
11) вычислительные комплексы и абонентские пункты;
12) оконечные абонентские устройства и аппаратура (коммутаторы).

Данные группы техники связи и АСУ являются типичными при решении задач технического обеспечения. Принятое разбиение по грушам может уточняться в зависимости от уровня новых разработок, технологий производства и ремонта и носит условный характер.

Структура модели характеризуется числом элементов в рассматриваемой системе. Их количество определяется оперативным составом войск, техникой связи, которая используется в системе связи и войсках объединения в период непосредственной угрозы агрессии. Эта величина является переменной и задается перед началом моделирования в исходных данных.

Вторая группа параметров модели отражает численность личного состава подразделений технического обеспечения – A^*, а также их распределение по специализации и уровням иерархии войск – $a_{z\,i}$. Варьируя показателями значения этих параметров определяется рациональная структура органов системы ТОС и АСУ.

К третьей группе параметров относятся общее количество заявок, поступивших в систему ТОС и АСУ – N_z, количество заявок, получивших отказ в обслуживании – $N_{z\,отк}$, количество заявок, выполненных на различных уровнях системы – $N_{z\,i}$. количество заявок, получивших отказ в обслуживании на каждом из уровней – $N_{z\,I\,отк}$. В отличие от ранее разработанных моделей функционирования системы ТОС и АСУ объединения в предлагаемой модели учитывается восполнение вышедшего из строя образца техники связи за счет ближайшего резервного образца ТС путем его поиска и доставки по рассчитанному маршруту (S_z) за минимальное время ($t_{z\,дост.}$), а также расчет и минимизация времени проведения технической разведки $\tau_{разв.}$, эвакуации $\tau_{эв.}$, ремонта $\tau_{рем.}$ и снабжения $\tau_{снаб}$.

Кроме того, при разработке модели функционирования системы ТОС и АСУ объединения учитываются следующие параметры: оперативно-тактическая характеристика в период непосредственной угрозы агрессии конкретных условий – $Q_{оп.\text{-}такт.}$; допустимые ресурсы различного вида в системе ТОС и АСУ для проведения работ на i-том уровне иерархии войск – $R_{i\,рес.\,доп.}$; требуемый объем мероприятий по обеспечению требуемого качества техники связи в различные периоды действий объединения – $V_{треб.}(t)$; время реакции органов системы ТОС и АСУ на внешние воздействия – $T_{реак.}$; физико-географические условия, при (и на) которых выполняются задачи и мероприятия системой ТОС и АСУ объединения – $G_{физ.\text{-}геогр.}$.

Все указанные параметры определяют качество функционирования органов ТОС и АСУ объединения и системы в целом при проведении мероприятий технического обеспечения. Степень их влияния исследуется в процессе проведения экспериментов на разработанной модели [5].

Значения фактических возможностей органов определены в результате моделирования процесса функционирования системы ТОС и АСУ, а целевые – при расчете требуемых ресурсов органов системы в соответствии с потребностями войск и требованиями системы связи. Рассогласование между целевыми и фактическими возможностями обусловлено влиянием неуправляемых и вероятностных факторов и может быть снижено за счет регулируемой группы факторов, т.е. сокращением времени на поиск и доставку резервного экземпляра техники связи, комплекта ЗИП, комплекта ВТИ, перераспределением специалистов технического обеспечения и должностных лиц органов управления ТОС и АСУ в ходе функционирования системы.

Как уже указывалось, время выполнения основных работ проводимых органами ТОС и АСУ в период непосредственной угрозы агрессии является случайной величиной и включает несколько составляющих: длительности проведения технической разведки $\tau_{разв.}$, эвакуации $\tau_{эв.}$, ремонта $\tau_{рем.}$, снабжения

$\tau_{снаб.}$, время доставки z-го экземпляра техники связи – $t_{z\,дост.}$ и т. д. Расчет параметров этой группы осуществляется по выражению:

$$\tau_{\sum} = b[(S/V) + \tau_{разв.} + \tau_{эв.} + \tau_{рем.} + \tau_{снаб.} + \tau_{разв.} + \tau_{сверт.} + z + t_{z\,поиска} + t_{z\,дост.}], \quad (1)$$

где b – количество перемещений органов ТОС и АСУ за время проведения мероприятия;

S – среднее расстояние одного перемещения органов ТОС и АСУ, км;

V – средняя скорость перемещения органов ТОС и АСУ, км/час;

$t_{разв.}$ – время развертывания органов ТОС и АСУ, час;

$t_{сверт.}$ – время свертывания органов ТОС и АСУ, час;

z – среднее время на организацию охраны, инженерное оборудование и т. д., час;

$t_{z\,поиска}$ – время поиска z-го экземпляра техники связи, час;

$t_{z\,дост.}$ – время доставки z-го экземпляра техники связи по рассчитанному маршруту (S_z), час;

При организации восполнения техники связи объединения в период непосредственной угрозы агрессии необходимо распределить специалистов органов системы ТОС и АСУ по уровням иерархии для того, чтобы удовлетворить заданные потребности войск в работоспособной технике при минимальных затратах времени и, тем самым, выполнить требования системы связи (предъявляемые к системе ТОС и АСУ по мобильности, боевой готовности элементов и системы в целом, живучести, производственной мощности).

Математическая постановка этой задачи может быть представлена в следующем виде.

Пусть имеется A_z^* специалистов технического обеспечения, требуется восполнить $N_z(t)$ единиц техники связи за время проведения мероприятия – t, которые отличаются степенью важности с точки зрения организации связи в объединении в период непосредственной угрозы агрессии, где степень важности восполнения техники связи i-го уровня системы ТОС и АСУ – c_i. Для всех $N_z(t)$ единиц техники связи ее значение будет задаваться совокупностью:

$$\{c_i;\, i = 1, N_z(t)\}, \quad (2)$$

В связи с тем, что все образцы техники связи будут требовать различные объемы работ, то восполнение каждого из них будет характеризоваться вероятностью успешного выполнения мероприятий технического обеспечения P_i для любого уровня системы ТОС и АСУ. Задача распределения сводится к:

1) определению, какой ресурс, в частности специалистов технического обеспечения, выделить каждому уровню системы ТОС и АСУ при
2) достижении максимального выигрыша при решении задачи оптимизации маршрута доставки z-го экземпляра техники связи и минимизации времени его поиска (по принципу ближайший свободный – резервный) и доставки.

Если выделить i-му уровню системы a_i ресурс, то задача сводится к выбору такого распределения:

$$a = \{a_i;\, i = 1, N_z(t)\}, \quad (4)$$

чтобы суммарный выигрыш в восполнении $N_z(t)$ образцов техники связи с учетом степени важности каждого из них:

$$\psi_i(c_i) = c_i[1-(1-P_i)^{a_i}], \tag{5}$$

был бы максимальным с учетом минимизации времени поиска z-го экземпляра техники связи и оптимизации маршрута его доставки:

$$\begin{cases} F(a) = \sum_{i=1}^{N_z} c_i[1-(1-P_i)^{a_i}], \text{ при } a_i \geq 0 \\ \sum_{i=1}^{N_z} a_i = A_z^* \\ t_{z\,\text{поиска}},\ t_{z\,\text{дост.}} \to \min \\ S_z \to \min \end{cases} \tag{6}$$

Таким образом, задача является нелинейной целочисленной задачей математического программирования, заключающейся в таком выборе набора a_i, чтобы целевая функция $F(a)$ была бы максимальной при выполнении условий (6).

Литература

1. Легкий Н. М. Активная радиочастотная идентификация в системах позиционирования подвижных объектов // Наука и техника транспорта. 2010. № 2. С. 41–45.

2. Семенов С. С., Воловиков В. С., Смолеха А. В. Концептуальная модель процесса восполнения потерь техники связи и военно-технического имущества связи при применении соединения связи Военного округа // T-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 1. С. 22–28.

3. Баринов М. А., Захаров А. А., Чихачев А. В. Техническое обеспечение связи и автоматизации. СПб.: ВАС, 2010. 320 с.

4. Руководство по проверке и оценке состояния вооружения и военной техники общевойскового назначения в Вооруженных Силах Российской Федерации. Приказ Минобороны РФ № 255 от 27 июня 1996 г.

5. Ануфриев А. А., Захаров А. А., Чихачев А. В. Теоретические основы технического обеспечения связи. СПб.: ВАС, 2011. 464 с.

References

1. Legkiy N. M. Aktivnaya radiochastonaya identifikatsiya v sistemakh pozitsionirovaniya podvizhnnykh obyektov [Active RFID positioning systems moving objects]. *Nauka i tekhnika transporta*, 2010, no. 2, pp. 41-45 (in Russian).

2. Semyonov S. S., Volovikov V. S., Smoleha A. V. Conceptual model of the process to fill the loss of communications technology and military equipment connection when using the communication link of the Military District. *T-Comm*, 2009, no. 1, pp. 22-28 (in Russian).

3. Abyshko V. Y., Barinov M. A., Zakharov A. A., Chikhachev A. V. *Tekhnicheskoye obespecheniye svyazi i avtomatizatsii* [Technical support communication and automation]. Saint-Petersburg, Budyonny Military Academy of Communications, 2010. 320 p. (in Russian).

4. *Guide for the verification and assessment of weapons and military equipment combined arms appointments in the Armed Forces of the Russian Federation*. Order of Russian Ministry of Defense number 255 of 27 June 1996.

5. Anoufriev A. A., Zakharov A. A., Chikhachev A. V. *Teoreticheskiye osnovy tekhnicheskogo obespecheniya svyazi* [Theoretical foundations of technical maintenance of communication]. Sant-Peterburg, Budyonny Military Academy of Communications, 2011. 464 p. (in Russian).

Статья поступила 11 ноября 2015 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. Тел.: +7 911 117 11 08. E–mail: semsem@yandex.ru

Алисевич Евгения Александровна – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: информационная экономика; метрологическое обеспечение; техническое обеспечение связи. Тел.: +7 921 638 45 78. E–mail: ezhilkina@yandex.ru

Педан Алексей Викторович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: техническое обеспечение связи; техническая разведка техники связи; методы и способы распознавания образов. Тел.: +7 929 101 78 94. E–mail: mycop14@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. Тел.: +7 911 085 07 50. E–mail: a.1802@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Formulation of the Problem to Develop the Model of the System of Technical Maintenance of Communication and Automated Control Systems Association During the Period of Direct Threat of Aggression

S. S. Semenov, Y. A. Alisiyevich, A. V. Pedan, A. V. Smoleha

Model of technical maintenance of communication and automated control systems (TMC and ACS) association operate during the period of direct threat of aggression. The system consists of a large number of components and interconnections there between and includes the process of replenishment communication equipment that fail due to various factors. The development of TMC and ACS is the use of RFID technology

*and telemetry by defining the coordinates of communication equipment and property in dynamics of their movements in real time, also use the information on the location of communication equipment. The p**urpose of research is to** increase the efficiency of functioning of the system of technical maintenance of communication and automated control systems association **The main result** is the selection factors (and classified into groups) that affect the functioning of the TMC and ACS system in association during the period of direct threat of aggression; determination of the parameters that characterize the complex organizational and technical system – the TMC and ACS system, as well as review of the activities of technical support specialist departments with certain qualifications and that (experts) assigned to various levels of the hierarchy of the system. **The scientific novelty** of this work is to develop scientific and methodological support to integrate communication equipment and property due to the use of RFID technology and telemetry. **The practical significance** of the work lies in the application of technical proposals for the officials in the registration of communication equipment based on radio frequency identification technology in the TMC and ACS system.*

Keywords: *system of technical maintenance of communication and automated control systems, communication equipment, technology of radio-frequency identification and telemetry.*

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

Yevgeniya Aleksandrovna Alisiyevich – 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: information economy; metrological maintenance; technical maintenance of communication. E–mail: ezhilkina@yandex.ru

Alexsey Victorovich Pedan – Postgraduate, military student at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: technical maintenance of communication; technical intelligence of the communication equipment; methods and techniques of patern recognition. E–mail: mycop14@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 681.3.06 (075.32)

Об информационной поддержке деятельности в системах управления критическими технологиями на основе ситуационных центров

Зацаринный А. А., Козлов С. В., Шабанов А. П.

Введение: *рассматривается подход к информационной поддержке деятельности по прогнозированию научно-технических достижений в системах управления критическими технологиями, – технологиями, относящимися к основным направлениям научно-технического развития.* ***Характеристика:*** *данный подход обеспечивает сбор информации, в первую очередь, об объектах интеллектуальной собственности, относящихся к критическим технологиям и опубликованных в различных источниках ведущих мировых государств; производство оценки эффективности отечественных и зарубежных технологий в сопоставлении их с мировыми образцами и разработка прогнозов – сценариев решений по развитию технологий.* ***Технический результат:*** *при использовании данного подхода достигается автоматизация процессов управления разработкой сценариев решений на основе выполнения инновационного авторского способа информационной поддержки деятельности организационных систем на базе ситуационных центров.* ***Суть:*** *с помощью способа определяется степень эффективности критических и других технологий, зарегистрированных в патентных ведомствах различных государств; производится фиксирование состояний конкретных технологий, относящихся к конкретному государству – как удовлетворительное, или предупреждающее, или угрожающее, в зависимости от состояний технологий разрабатываются, или определяются из числа заранее разработанных, сценарии решений по управлению технологиями, в том числе, по их развитию.* ***Практическая значимость:*** *внедрение представленного в статье способа информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров в отечественную практику позволит непрерывно отслеживать ситуацию в технологической сфере и сократить время на принятие и исполнение решений по управлению технологиями в разрезе трёх уровней национальной безопасности: удовлетворительного, предупреждающего и угрожающего.*

Ключевые слова*: критические технологии, информационная поддержка деятельности по управлению технологиями, прогнозирование, ситуационные центры, сценарии решений.*

Постановка задачи

Прогнозирование развития науки и техники в России осуществляется через систему прогнозных документов, в которую входят: общегосударственный долгосрочный прогноз научно-технического развития (на 10-15 и более лет), частные научно-технические прогнозы на макроэкономическом и отраслевом уровнях (до 10 лет). К прогнозированию привлекаются научные учреждения Российской академии наук, ведущие отраслевые научно-технические организации, крупные ученые и специалисты. С целью своевременной информационной поддержки принятия решений по обеспечению экономической и военной безопасности России, наряду с другими, осуществляется деятельность по прогнозированию научно-технических достижений. Актуальность такой деятельности обусловлена существующей проблемой по преодолению имеющегося технологического отставания от развитых зарубежных стран, необходимостью в кратчайшие сроки осуществить кардинальное инновационное обновление промышленного комплекса страны [1].

В статье в рамках указанной проблемы рассматривается задача по

созданию и организации функционирования единой информационной среды для прогнозирования научно-технических возможностей ведущих мировых государств, разработки и применения сценариев решений по управлению отечественными технологиями. Предлагается решение данной задачи с помощью авторского способа информационной поддержки деятельности организационных систем, выполняемого на основе ситуационных центров [2], который наиболее полно представлен в книге [3].

Интеллектуальная база данных для прогнозирования

Деятельность по прогнозированию научно-технических возможностей зарубежных государств выполняется с учётом сформировавшихся в мире взглядов об основных направлениях научно-технического развития. В России и в других развитых странах в настоящее время зеркалом, которое отображает эти взгляды, являются классы, подклассы и группы объектов интеллектуальной собственности, которые представлены, в первую очередь, в Международной патентной классификации (МПК). Последняя редакция МПК 2015 года содержит 71 738 рубрики (разделы, классы, подклассы, группы). Накоплено огромное число патентов, каждый год их число увеличивается более чем на миллион. При этом следует учитывать, что в настоящее время находит применение концепция технологических укладов, согласно которой перспективным принято считать 6-й уклад. Контуры этого уклада только начинают складываться в развитых странах мира, в первую очередь – в США, Японии и КНР. Данный уклад характеризуется когнитивностью объектов интеллектуальной собственности, нацеленностью на развитие и применение перспективных технологий (биотехнологий и нанотехнологий, генной инженерии, мембранных и квантовых технологий, микромеханики, термоядерной энергетики, информационных технологий и др.). На сегодня признаётся, что синтез достижений в этих направлениях должен обеспечить выход на принципиально новый уровень в системах управления государством, обществом, экономикой. Поэтому объекты интеллектуальной собственности, относящиеся к основным направлениям научно-технического развития, принято считать перспективными или критическими. Как правило, перспективные объекты соотносят с технологиями 6-го уклада.

К объектам интеллектуальной собственности, которым при регистрации присваивается класс МПК, являются изобретения, полезные модели. Важным признаком использования изобретений и полезных моделей в промышленности является наличие таких объектов интеллектуальной собственности, как промышленные образцы, товарные знаки и услуги, программы для ЭВМ и базы данных, которые разработаны на основе соответствующих изобретений и полезных моделей и регистрируются в патентных ведомствах зарубежных стран и России. Число таких объектов, относящихся к критическим технологиям, характеризуют масштаб применения этих технологий в том или ином государстве. Важным фактором для повышения эффективности процесса сбора статистических данных о перспективных зарубежных объектах интеллектуальной собственности, является практика российского патентного

ведомства (Роспатента), в части регистрации объектов интеллектуальной собственности физических и юридических лиц зарубежных стран. Как правило, эти объекты ранее запатентованы в своих национальных ведомствах или международных (например, в Европейском патентном бюро). В России и в мире, в целом, накоплен огромный массив информации об объектах интеллектуальной собственности, отражающих научно-технические возможности зарубежных государств, и обеспечен регламентированный доступ к этой информации.

Объекты, информация о которых является исходными данными для прогнозирования, представляет собой совокупность логически взаимоувязанных документов МПК; документов международной классификации товаров и услуг (МКТиУ); документов международной классификации промышленных образцов (МКПО) и других. Доступ к электронным документам – объектам наблюдения (далее по тексту, объектам) в процессах прогнозирования, и сбор данных о них может осуществляться с помощью web-браузера через сайты патентных национальных ведомств и международных бюро. Регулярно, как правило, ежегодно, обновляются рубрики МПК. Например, за предшествующий годовой период пересмотра МПК было введено 345 новых рубрик и аннулировано 39. Это затронуло 7 из 8 разделов МПК, а число изменённых рубрик – 868. Появился новый класс «Технология послойного синтеза». В частности, особое место занимают нанотехнологии – в 2015 г. продукция, произведённая с её использованием, по прогнозам составит ~15% мирового ВВП, а в 2030 г. уже 40%. Классификация объектов в процессах прогнозирования может производиться на основе классификации российского национального ведомства, в которой объекты наблюдения рассредоточены в соответствии с таблицей 1.

Ниже представлены основные источники информации для интеллектуальной базы знаний, документы которых могут быть объектами для процессов прогнозирования:

1) Российское бюро патентов и торговых марок (http://www.fips.ru);
2) Российское авторское общество (http://www.rao.ru);
3) Европейское бюро патентов, EPO (http://www.rupto.ru);
4) Бюро патентов и торговых марок США (http://www.uspto.gov);
5) Бюро патентов Великобритании (http://www.patent.gov.uk);
6) Бюро интеллектуальной собственности Австралии (http://www.ipaustralia.gov.au);
7) Бюро интеллектуальной собственности Канады (http://cipo.gc.ca);
8) Патентное бюро Дании (http://www.dkpto.dk);
9) Государственное бюро интеллектуальной собственности КНР (http://www.cpo.cn.net);
10) Национальный институт промышленной собственности Франции (http://www.inpi.fr);
11) Бюро патентов и торговых марок Германии (http://www.deutsches-patentamt.de);
12) Правительственный отдел интеллектуальной собственности Гон-

Конга (http://info.gov.hk);
13) Бюро патентов и торговых марок Италии (http://www.european-patent-office.org/it);
14) Патентное бюро Японии (http://www.jpo.go.jp);
15) Бюро промышленной собственности Нидерландов (http://www.bie.nl);
16) Бюро интеллектуальной собственности Новой Зеландии (http://www.iponz.govt.nz);
17) Регистратура торговых марок и патентов Сингапура (http://www.ipos.gov.sg);
18) Бюро патентов и торговых марок Испании (http://www.oepm.es);
19) Бюро патентов Швеции (http://www.prv.se);
20) Швейцарский федеральный институт интеллектуальной собственности (http://www.ige.ch);
21) Всемирная организация интеллектуальной собственности, WIPO (http://www.wipo.int/).

Таблица 1 – Классификация объектов в процессах прогнозирования

Разделы	Реестры запатентованных и зарегистрированных объектов	Реестры незапатентованных и незарегистрированных объектов
Изобретения	Реестр изобретений	Реестр заявок на выдачу патента на изобретение
Полезные модели	Реестр полезных моделей	Реестр заявок на выдачу патента на полезную модель
Промышленные образцы	Реестр промышленных образцов	Реестр на выдачу патента на промышленный образец
Товарные знаки	Реестр товарных знаков и знаков обслуживания	Реестр заявок на регистрацию товарного знака и знака обслуживания
	Реестр общеизвестных товарных знаков	
	Реестр международных товарных знаков	
Наименование места происхождения товаров	Реестр наименований мест происхождения товаров	Реестр заявок на регистрацию наименования места происхождения товара
Программы для ЭВМ, базы данных и топологии интегральных схем	Реестр программ для ЭВМ	
	Реестр баз данных	
	Реестр топологий интегральных схем	

Существует множество других источников, документы которых могут быть объектами для процессов прогнозирования с помощью web-браузера, в том числе:

1) Патентно-правовые периодические издания и интернет сайты государственных ведомств, национальных и международных организаций, размещённые:
   - в России (как минимум, 32 источника);
   - в Великобритании (как минимум, 19 источников);

- в Германии (как минимум, 12 источников);
- в США (как минимум, 11 источников) и в других государствах.

2) Дополнительная литература, в которой приводятся полезные сведения, в том числе, для организации процессов сбора данных для прогнозирования по отраслям промышленности конкретных государств.

Таким образом, можно утверждать, что существует интеллектуальная база данных, информация об объектах которой, является исходными данными для прогнозирования научно-технических возможностей зарубежных государств.

Дорожная карта прогнозирования

Наличие необходимой информации и обеспечение доступа к ней ещё не означает наличие знаний о научно-технических достижениях зарубежных государств. А эти знания необходимы для принятия решений по обеспечению экономической и военной безопасности России на основе развития своей экономики и средств противодействия угрозам. Наибольшую трудность при получении таких знаний создаёт огромное число объектов, о которых надо собрать информацию. Например, только в одном патентном ведомстве Японии по состоянию на сентябрь 2015 года хранится более 11 млн документов. Сбор, обработка и анализ таких больших объёмов данных может потребовать затраты, которые несоизмеримы с реальными возможностями организационных систем, выполняющих работы по прогнозированию. Поэтому поиск обоснованных решений по сокращению объёма исходной информации является одной из частных задач прогнозирования. Есть признаки, свидетельствующие о возможном успешном решении данной задачи. Так наблюдается международный опыт модернизации МПК по регулярной смене версий путём исключения устаревших и ввода новых классов, подклассов и групп объектов. Это позволяет своевременно обнаруживать новые перспективные объекты интеллектуальной собственности зарубежных авторов и не рассматривать объекты устаревших классов. Появление критических технологий позволяет предложить в качестве одного из способов сокращения объёма собираемых данных сосредоточить усилия, в первую очередь, на сборе данных об объектах, относящихся к критическим технологиям. К критическим технологиям относятся следующие технологии [4]:

1) Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники, боеприпасов и спецхимии.
2) Базовые технологии силовой электротехники.
3) Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии.
4) Геномные, протеомные и постгеномные технологии.
5) Тканевые и клеточные технологии, репродуктивные технологии, включая клеточные, в медицине и ветеринарии.
6) Компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий;

7) Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии.
8) Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.
9) Технологии биоинженерии и генной инженерии.
10) Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств.
11) Технологии доступа к широкополосным мультимедийным услугам.
12) Технологии информационных, управляющих, навигационных систем.
13) Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения.
14) Технологии наноустройств и микросистемной техники.
15) Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.
16) Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений.
17) Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов.
18) Технологии поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, распространения и защиты информации.
19) Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем.
20) Технологии производства металлов и сплавов со специальными свойствами, используемых при производстве вооружения и военной техники.
21) Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.
22) Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.
23) Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов.
24) Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов.
25) Технологии создания биосовместимых материалов.
26) технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта.
27) Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов.
28) Технологии создания и обработки кристаллических материалов.
29) Технологии создания и обработки полимеров и эластомеров.
30) Технологии создания мембран и каталитических систем.
31) Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения.
32) Технологии создания электронной компонентной базы, включая обеспечение ее устойчивости к действию факторов космического

пространства.

33) Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.
34) Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем.
35) Технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний.
36) Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе.
37) Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания.
38) Технологии создания энергоэффективных световых устройств.
39) Технологии создания и применения конденсированных энергетических систем, включая твердые ракетные топлива нового поколения.
40) Технологии компьютерного моделирования технически сложных изделий и систем, а также объектов промышленной инфраструктуры.
41) Технологии контроля и оперативной диагностики состояния технически сложных объектов.
42) Технологии криобиологии и сохранения биоматериалов.
43) Технологии разработки и производства иммунобиологических лекарственных препаратов, а также медицинских изделий, предназначенных для диагностики, профилактики и лечения заболеваний, представляющих опасность для окружающих.

В России, несмотря на то, что доля 6-го технологического уклада невелика, отдельные регионы РФ уже ведут активную политику в области стимулирования инновационной деятельности, внедрения новых технологий [5]. Это является обнадёживающим фактором для привлечения в деятельность по прогнозированию научно-технических достижений широкого круга заинтересованных лиц и организационных систем – предприятий, учреждений.

В целом, как видно из выше изложенного, становится очевидным, что для того, чтобы получить исходные данные в достаточном объёме, произвести их анализ и выдать достоверные прогнозы, потребуется:

- систематизировать и автоматизировать процесс управления технологиями, как минимум, на первом этапе в объёме критических технологий;
- на основе существующей интеллектуальной базы данных для прогнозирования создать и организовать функционирование единой информационной среды с разграничением доступа к ней субъектов управления в соответствии с их специализацией в технологической области.

Для систематизации и автоматизации процесса управления технологиями необходимо:

1) Разработать новый или использовать известный способ информационной поддержки деятельности организационных систем для прогнозирования научно-технических возможностях государств и, в целом, для управления технологиями. Данный способ должен обеспечить возможность предоставления лицам, принимающим решения по управлению и, в частности, по развитию критических технологий, достоверной и своевременной информацией о научно-технических возможностях государств и о сценариях решений.
2) Разработать новые технические решения или использовать известные технические решения для выполнения, указанного выше способа информационной поддержки деятельности организационных систем. Например, технические решения по построению ситуационных центров с привязкой к ним аналитических центров (центров прогнозирования). Такие решения должны обеспечить взаимодействие субъектов управления в различных областях технологий в рамках единой информационной среды, систематизировать исходные данные и исключить анализ одних и тех же данных различными организационными системами.
3) Определить организационные системы – ведомства, научные учреждения, производственные комплексы, предприятия, аналитические службы которых должны участвовать в процессах прогнозирования, в процессах развития технологий и, в целом, в процессах управления технологиями.
4) Спланировать и осуществить необходимые мероприятия для оснащения и привязки указанных выше организационных систем к существующим и вновь разрабатываемым ситуационным центрам.

Способ информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров

В настоящее время известен способ информационной поддержки деятельности организационных систем [2]. Способ построен на основе комплексной системы взаимоувязанных нормированных и фактических показателей эффективности деятельности организационной системы. В основе определения показателей эффективности деятельности лежат фактические показатели тех объектов управления в зонах ответственности ситуационных центров и во внешней среде, которые оказывают влияние на деятельность организационной системы. В зависимости от состояния деятельности организационной системы производится выбор сценариев принятия решений для их исполнения. Известны технические решения по реализации данного способа на основе системы распределённых ситуационно-аналитических центров [6] или центра управления [7], в зависимости от видов деятельности и масштаба поддерживаемых организационных систем.

Данные способ и технические решения по его реализации могут быть использованы в системе управления технологиями для прогнозирования научно-технических возможностей государства в технологической сфере и, в

целом, для управления этими технологиями. Применительно к видам деятельности, осуществляемой при управлении технологиями, этапы способа [2] можно сформулировать следующим образом:

Первый этап. Моделирование:

- формирование нормированных показателей объектов технологий, о состояниях этих технологий, о критических и допустимых показателях эффективности этих технологий.
- разработка сценариев решений по управлению технологиями – компьютерных алгоритмов, команд управления, организационно-методических документов по разработке и проведению мероприятий, относящихся к развитию, в первую очередь, критических технологий.

Второй этап. Настройка – запись нормированных данных и сценариев решений в память системы распределённых ситуационно-аналитических центров [6] или центра управления [7].

Третий этап. Контроль – определение фактических показателей объектов и фактических состояний технологий.

Четвёртый этап. Оценка фактической эффективности технологий.

Пятый этап. Разработка прогнозов – определение сценариев решений: выбор из числа известных (см. 1-й этап) или выработка сценариев по управлению разработкой, развитием и применением технологий.

Шестой этап. Развитие – реализация мероприятий по управлению разработкой, развитием и применением технологий.

Основным результатом, который достигается при выполнении способа информационной поддержки деятельности организационных систем [2], при его использовании для управления технологиями на основе ситуационных центров, является сокращение времени на принятие и исполнение решений (гипотетически это показано на рис. 1).

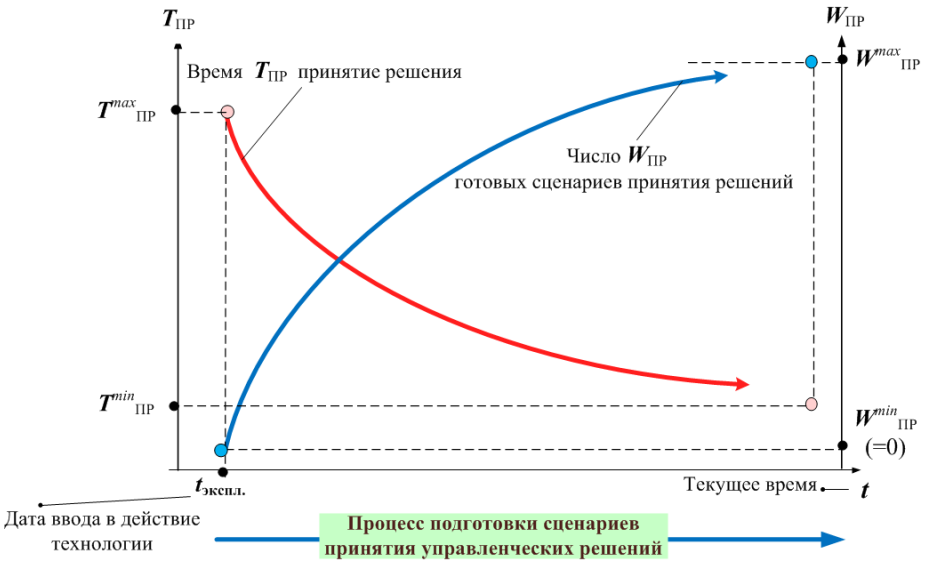


Рис. 1. Гипотетическая диаграмма эффективности способа

Система показателей эффективности технологий

Система показателей эффективности технологий при использовании

способа [2] строится на последовательном определении показателей объектов технологий, эффективности отдельных технологий и общей технологической эффективности. Оценка эффективности технологий производится с применением нормированных, фактических, критических и допустимых показателей, приведённых в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели для оценки эффективности технологий

Показатель	Описание
N и $n = 1, \ldots, N$	Число и индекс технологии.
M и $m = 1, \ldots, M$	Число и индекс государства.
D и D^*	Нормированный и фактический показатель общего состояния технологий.
D_n и D^*_n	Нормированный и фактический показатель состояния n-й технологии.
ΔD^*, ΔD^*_n	Фактический показатель общей технологической эффективности и фактический показатель эффективности n-й технологии.
$\Delta D_{\text{крит.}}$	Критический показатель общей технологической эффективности, снижение, по сравнению с которым, фактического показателя ΔD^* означает проявление угрозы для технологической безопасности страны в целом.
$\Delta D_{\text{доп.}}$	Допустимый показатель эффективности общей технологической эффективности, снижение, по сравнению с которым, фактического показателя ΔD^* означает возможность появления угрозы для технологической безопасности страны в целом.
$\Delta D_{n\text{-крит.}}$	Критический показатель эффективности n-й технологии, снижение, по сравнению с которым, фактического показателя ΔD^*_n означает проявление угрозы, связанной с n-й технологией.
$\Delta D_{n\text{-доп.}}$	Допустимый показатель эффективности n-й технологии, снижение, по сравнению с которым, фактического показателя ΔD^*_n означает возможность появления угрозы, связанной с n-й технологией.
S_{nm} и S^*_{nm}	Нормированный и фактический показатель состояния n-й технологии, применяемой в m-ом государстве.
α_n	Приоритет n-й технологии среди других технологий.
β_{nm}	Приоритет m-го государства среди других государств, которые применяют n-ю технологию.
K и $k = 1, 2, \ldots, K$	Число K источников информации и индекс k источника информации.
L_k и $l = 1, \ldots, L_k$	Число L_k объектов в k-м источнике и индекс l объекта в k-м источнике.
V^l_{nmk} и V^{*l}_{nmk}	Нормированный и фактический показатель l-го объекта в k-ом источнике, который соотносится с n-й технологией, применяемой в m-м государстве.
V_{nmk} и V^*_{nmk}	Нормированный и фактический показатель объектов в k-ом источнике, которые соотносятся с n-й технологией, применяемой в m-м государстве.

Особенности процесса оценки эффективности технологий следующие:

1) Объекты технологий – объекты интеллектуальной собственности.

2) Отличительным признаком принадлежности объекта к той или другой технологии является его классификационный индекс (например, для изобретений и полезных моделей это МПК). Конкретный объект может быть соотнесён более чем с одной технологией.
3) Отличительным признаком применения объекта технологии – изобретения или полезной модели, в том или ином государстве является факт патентования промышленного образца или регистрации товарного знака, программы для ЭВМ, базы данных, соотнесённый с одним или более патентом на изобретение или на полезную модель.
4) Показатель объекта – число его применяемых экземпляров в виде промышленного образца, товарного знака, программы для ЭВМ, базы данных.
5) Состояние технологии – обобщённый показатель, формируемый путём обобщения по определённому правилу показателей объектов, относящихся к этой технологии с помощью расчётных соотношений.
6) Сбор информации о фактических показателях объектов наблюдаемых технологий и оценка эффективности технологий производится на регулярной основе через определённые в регламентах временные интервалы. При этом за нормированные показатели в текущем временном интервале принимаются соответствующие фактические показатели, наблюдаемые в предыдущем временном интервале.

Ниже приведены расчётные соотношения, позволяющие оценить в различных разрезах состояние технологий в отдельных государствах, динамическую эффективность технологий во временных интервалах и сравнительную эффективность применения технологий в отдельных государствах.

Расчёт общей для всех рассматриваемых государств технологической эффективности:

$$\Delta D^* = D^*/D.$$

Расчёт фактического и нормированного показателя общего состояния технологий:

$$D^* = \alpha_1 D^*_1 + \alpha_2 D^*_2, + \ldots + \alpha_N D^*_N,$$
$$D = \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2, + \ldots + \alpha_N D_N.$$

Расчёт эффективности n-й технологии:

$$\Delta D^*_n = D^*_n/D_n.$$

Расчёт фактического и нормированного показателя состояния n-й технологии с учётом приоритетов государств:

$$D^*_n = \beta_{n1} S^*_{n1} + \beta_{n2} S^*_{n2}, + \ldots + \beta_{nM} S^*_{nM},$$
$$D_n = \beta_{n1} S_{n1} + \beta_{n2} S_{n2}, + \ldots + \beta_{nM} S_{nM},$$

Расчёт эффективности n-й технологии, применяемой в m-ом государстве:

$$\Delta S^*_{nm} = S^*_{nm}/S_{nm}.$$

Расчёт фактического и нормированного показателя состояния n-й технологии, применяемой в m-ом государстве:

$$S^*_{nm} = \gamma_{nm1} V^*_{nm1} + \gamma_{nm2} V^*_{nm2}, + \ldots + \gamma_{nmK} V^*_{nmK},$$
$$S_{nm} = \gamma_{nm1} V_{nm1} + \gamma_{nm2} V_{nm2}, + \ldots + \gamma_{nmK} V_{nmK}.$$

Расчёт фактического и нормированного показателя l-го объекта в k-ом источнике, который соотносится с n-й технологией, применяемой в m-м государстве:

$$V^*_{nmk} = V^{*1}_{nmk} + V^{*2}_{nmk} + \ldots + V^{*L_k}_{nmk},$$

$$V_{nmk} = V^1_{nmk} + V^2_{nmk}, + \ldots + V^{L_k}_{nmk}.$$

На основе результатов, полученных при оценке эффективности технологий, выбираются из подготовленных или разрабатываются новые сценарии решений по управлению технологиями.

Важное место в представленном способе занимают показатели для определения степени эффективности (таблица 2). С помощью этих показателей и рекомендаций по их использованию, приведённых в работе [3], предоставляется возможность отслеживать состояние отечественных критических технологий в сопоставлении с мировыми образцами по трём уровням:

- удовлетворительный уровень;
- предупреждающий уровень – существует угроза для национальной безопасности;
- угрожающий уровень – критичное состояние, требующее принятия чрезвычайных решений.

Рекомендации

Проведённый в статье анализ возможности применения для информационной поддержки деятельности по прогнозированию научно-технических возможностей государств и, в целом, по управлению отечественными критическими технологиями на основе известных технических решений, показывает следующее.

1. Существует распределённая интеллектуальная база данных для прогнозирования, содержащая сведения о патентах на изобретения, полезные модели и промышленные образцы, о товарных знаках, базах данных и программах для ЭВМ. Интеллектуальная база данных включает в себя базы данных России, зарубежных государств и международных организаций, периодических и специализированных изданий. Накоплено огромное число патентов, каждый год их число увеличивается более чем на миллион. Доступ к патентам с целью проведения анализа представленных в них объектов интеллектуальной собственности возможен как непосредственно, так и на условиях оплаты. Распределение патентов на изобретения и полезные модели производится по рубрикам МПК. Огромное число патентов и многоуровневая и, одновременно, многофункциональная (по областям техники) система их классификации объективно предъявляют требование об использовании системного подхода к исследованию научно-технических достижений государств на основе анализа интеллектуальной базы данных патентов на изобретения и полезные модели, определения их связи с промышленными образцами, товарными знаками, программами для ЭВМ и базами данных. Для реализации такого системного подхода потребуются консолидированные усилия не только подразделений Роспатента, но и других ведомств, крупных

промышленных и научных объединений России, аналитических служб. Выработать достоверные прогнозы на разные периоды времени по содержанию научно-технических достижений и промышленному их применению без этого затруднительно.

2. Международные и национальные организации, на основе оценок экспертов в различных областях техники отслеживают новые направления исследований и патентования решений. Обновляются рубрики МПК, появляются новые классы. Судя по опубликованным работам специалистов-патентоведов и деятелей науки и техники, можно увидеть, что новые рубрики, фактически, соответствуют мировым взглядам на, как минимум, пятый, а чаще - шестой технологический уклад, на перспективные (критические) технологии. Таким образом, существует возможность сократить объём анализируемых материалов, используемых для выработки достоверных прогнозов на разные периоды времени по содержанию научно-технических достижений и промышленному их применению. Так представляется возможным ограничить данный объём временными рамками подачи заявок на получение патентов, например, 10-ю годами.

3. С учётом изложенного выше, необходимым условием для выработки достоверных прогнозов на разные периоды времени по содержанию научно-технических достижений и промышленному их применению является проведение мероприятий:

- по разработке нового способа или, что эффективнее с точки зрения времени внедрения способа, использованию известного способа [2] информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров;
- по созданию единой информационной среды для выполнения данного способа на основе информационного взаимодействия существующих и вновь вводимых ситуационных, аналитических центров и центров прогнозирования, например, путём использования известных технических решений – системы ситуационно-аналитических центров организационной системы [6] или центра управления организационной системы [7].

Внедрение предлагаемого способа информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров в отечественную практику прогнозирования научно-технических достижений позволит непрерывно отслеживать ситуацию в технологической сфере и принимать необходимые решения в разрезе трёх уровней национальной безопасности: удовлетворительного, предупреждающего и угрожающего.

Литература

1. Караваев И. Е. Особенности формирования и реализации государственной промышленной политики в оборонно-промышленном комплексе на современном этапе // Оборонный комплекс РФ: состояние и перспективы развития. 2012. Т. 8. С. 181–193. URL: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-8/III/Karavaev.pdf.

2. Зацаринный А. А., Сучков А. П., Шабанов А. П. Способ поддержки деятельности организационной системы // Патент RU2532723C2 на изобретение, опубл. 10.11.2014, бюл. № 31.

3. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 232 с.

4. Распоряжение Правительства РФ от 24 июня 2013 г. № 1059-р. «Изменения, которые вносятся в перечень технологий, имеющих важное социально-экономическое значение или важное значение для обороны страны и безопасности государства (критических технологий)» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2013. № 26. ст. 3410.

5. Монакова Е. А., Калугин В. А. Мониторинг технико-экономического развития региона // Международный журнал экспериментального образования. 2011. № 8. С. 254-255.

6. Зацаринный А. А., Козлов С. В., Сучков А. П., Шабанов А. П. Система ситуационно-аналитических центров организационной системы // Патент RU2533090C2, опубл. 20.11.2014, бюл. № 32.

7. Зацаринный А. А., Козлов С. В., Сучков А. П., Шабанов А. П. Центр управления организационной системы // Патент на полезную модель RU127493U1, опубл. 27.04.2013, бюл. № 12.

References

1. Karavaev I. E. Peculiarities of formation and realization of the State industrial policy in the military-industrial complex at the present stage. *The Defense complex of the Russian Federation: status and development prospects*, 2012, vol. 8, pp. 181–193. Available at: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-8/III/Karavaev.pdf (in Russia).

2. Zatsarinnyy A. A., Suchkov A. P., Shabanov A. P. Technology support activities of organization. *Patent of Russian Federation* RU2532723C2, publish. 10.11.2014, bul. no. 31 (in Russia).

3. Zatsarinnyy A. A., Shabanov A. P. *Technology of information support for the activities of organizations based on situational centers*. M.: TORUS PRESS, 2015, 232 p. (in Russia).

4. Russian Federation Government Decree no. 1059 June 24, 2013. “The changes that are made to the list of technologies that have important socio-economic significance or importance for national defense and security of the State (critical technologies)”. *Collection of laws of the Russian Federation*, 2013, no. 26, article 3410 (in Russia).

5. Monakova E. A., Kalugin V. A. Monitoring of the technical and economic development of the region. *International Journal of Experimental education*, 2011, no 8, pp. 254-255 (in Russia).

6. Zatsarinnyy A. A., Kozlov S. V., Suchkov A. P., Shabanov A. P. Situationally-system analytical centers of organizational system. *Patent of Russian Federation*, no. RU2533090C2, publish. 20.11.2014, bul. no. 32.

7. Zatsarinnyy A. A., Kozlov S. V., Suchkov A. P., Shabanov A. P. Control

Center of organizational system. *Russian Federation patent for utility model*, no. RU127493U1, publish. 27.04.2013, bul. no. 12 (in Russia).

Статья поступила 17 ноября 2015 г.

Информация об авторах

Зацаринный Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор. Заместитель директора. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН. Область научных интересов: информатика и телекоммуникации. Тел.: +7 (499) 135-62-60. E–mail: azatsarinnyy@ipiran.ru

Козлов Сергей Витальевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Заведующий отделом. Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН. Область научных интересов: информационно-телекоммуникационные сети. Тел.: +7 (499) 135-62-60. E–mail: skozlov@ipiran.ru

Шабанов Александр Петрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник. Ведущий научный сотрудник. Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН. Область научных интересов: информационная поддержка деятельности организационных систем – ведомств, предприятий, учреждений. E–mail: apshabanov@mail.ru

Адрес: Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, кор.2.

Information Support for the Activities of the Critical Technologies in Control Systems Based on Situational Centers

A. A. Zatsarinnyy, S. V. Kozlov, A. P. Shabanov

Introduction. *An approach to support activities on scientific and technological advances in control systems of critical technologies – technologies that are relevant to the main directions of scientific and technological development.* ***Characteristic***. *This approach ensures the collection of information primarily about the objects of intellectual property relating to critical technology and published in various sources of the world's leading States; analysis of the effectiveness of domestic and foreign technologies in comparison with global models and forecasting-scripting decisions on technology development.* ***Technical result***. *Using this approach achieves automation of managerial processes of elaboration of scenarios by implementing innovative solutions copyright way of Information support for the activities of the organizational systems based on situational centers.* ***The essence***. *Using this method is determined by the degree of effectiveness of critical technologies and other technologies that are registered in the patent offices of the States; produced recording technology-specific conditions relating to a particular State as satisfactory or warning status, or threatening the State. Depending on the particular State defines the solution scripts for technology management.* ***Practical significance***. *Implementation way of Information support for the activities of the organizational systems based on situational centers into national practice will continuously monitor the situation in the technological sphere and reduce the time for adoption and execution of decisions in technology management.*

Key words: *critical technologies, information support for the activities, prediction, situational centers and solution scripts.*

Information about Authors

Alexander Alekseevich Zatsarinnyy – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Deputy Director. Federal Research Center «Computer science and management» (FRC CSM) RAS. Field of research: Informatics and telecommunications. Tel: +7 499 135-62-60. E–mail: azatsarinnyy@ipiran.ru

Sergey Vitalievich Kozlov – Ph.D., Senior Researcher. Head of Department. Institute of Informatics problem of FRC CSM RAS. Field of research: information and telecommunication networks. Tel.: +7 499 135-62-60. E–mail: skozlov@ipiran.ru

Alexander Petrovich Shabanov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Senior Researcher. Leading Researcher. Institute of Informatics problem of FRC CSM RAS. Field of research: information support for the activities of the organizational systems – departments, enterprises and institutions. E–mail: apshabanov@mail.ru

Address: Russia, 119333, Moscow, Vavilova str., h. 44, s. 2.

УДК 004.052.32

Анализ возможностей применения подходов самодиагностирования к распределенной радиотехнической системе наблюдения

Журков А. П., Аминев Д. А., Гусева П. А.,
Мирошниченко С. С., Петросян П. А.

Постановка задачи: *несмотря на бурное развитие глобальных навигационных систем спутникового позиционирования, систем видеонаблюдения и технического зрения, радиолокация и радиопеленгация широко применяются и в настоящее время, поскольку в удаленных и малоосвоенных районах радиолокаторы и не обнаруживаемые автоматические радиопеленгаторы (АРП) являются одним из основных средств обеспечения полетов. Распределенная радиотехническая система наблюдения (РСН) состоит из аппаратуры местного диспетчерского пункта (МДП), каналов связи и необслуживаемых радиотехнических терминалов (НРТ), которые в зависимости от условий размещения могут быть удалены от МДП на расстояния до нескольких сотен километров. Поэтому актуальной является задача диагностики и определения неисправности НРТ и всей РСН в целом.* ***Целью работы*** *является поиск и исследование научно-методических подходов диагностирования сложных распределенных, многопроцессорных вычислительных и радиотехнических систем на предмет их применения в задаче создания метода и математической модели системы автоматизированного диагностирования пространственно-распределенной РСН. Рассматриваются основы теории диагностирования распределенных радиотехнических, цифровых и многопроцессорных систем. Приводится краткое изложение выбранных подходов и их применение относительно РСН.* ***Результат:*** *проведена локализация и выявлено концептуальное отношение рассматриваемых подходов к определенным элементам распределенной РСН – АРП, радиолокатору, блокам цифровой обработки данных и управления, системам электропитания, каналообразующей аппаратуры, каналам связи и пр.*

Ключевые слова: *диагностика, радиотехническая система, сеть связи, математический аппарат, контроль, микропроцессор, память, канал связи, радиопеленгация, радиолокация.*

Актуальность

Распределенная на местности радиотехническая система наблюдения (РСН) позволяет определять местонахождение неподвижных наземных станций и перемещение радиостанций наземных транспортных средств, морских судов и самолетов.

Построенная с топологией типа многоуровневая звезда (рис. 1), РСН состоит из аппаратуры местного диспетчерского пункта (МДП), каналов связи (КС) и необслуживаемых радиотехнических терминалов (НРТ), которые в зависимости от условий размещения могут быть удалены от МДП на расстояния до 200 километров. Поэтому актуальной является задача создания системы автоматизированного диагностирования и определения неисправности НРТ и МДП с глубиной поиска до съемного печатного узла и ограниченным сроком восстановления работоспособности РСН [1]. В рамках решения такой задачи, необходимо создавать математическую модель, для которой на начальном этапе нужно провести анализ существующих концепций, методов и подходов научно-методического аппарата к самодиагностированию (СД) электронных и микропроцессорных систем.

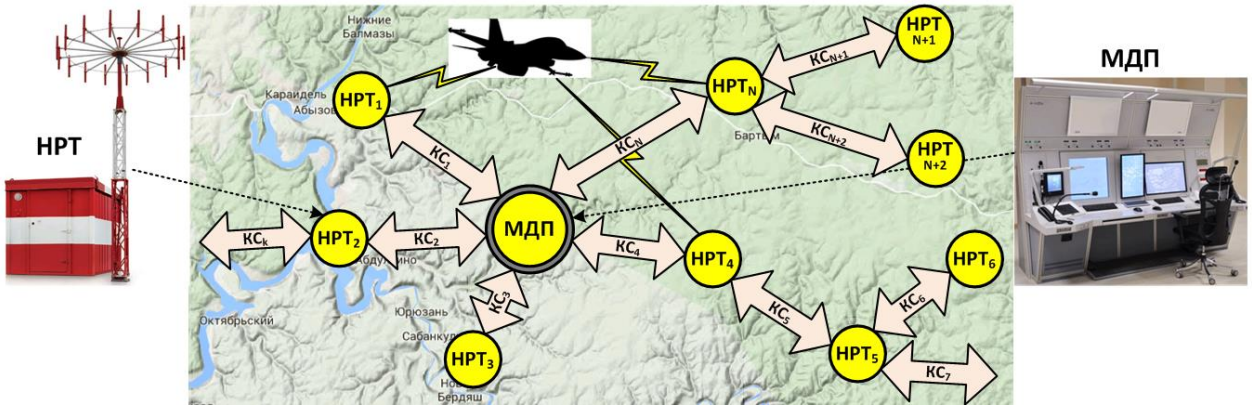


Рис. 1. Наземная распределенная радиотехническая система наблюдения

Постановка задачи

Структурная схема взаимодействия НРТ и МДП представлена на рис. 2. Здесь сигналы от доплеровской антенны и фазированной антенной решетки (ФАР) поступают на аналоговые автоматический радиопеленгатор (АРП) и радиолокатор (РЛ) НРТ соответственно. Построенный на основе процессоров (CPU) и памяти (MEM) блок цифровой обработки сигналов (ЦОС) формирует поток данных о пеленге и радиолокационные данные, которые затем передаются в каналы связи основной (КС) и резервный ($КС_р$) с помощью каналообразующей аппаратуры (КОА), состоящей из нескольких CPU и MEM. Поскольку НРТ является необслуживаемым, для него необходима автономная система энергообеспечения, которая также имеет в своем составе CPU и MEM, и нуждается в СД. Аналогичная КОА МДП принимает потоки данных от множества НРТ по КС и вводит их в многопроцессорную систему обработки. Подсистемы хранения, мониторинга и система энергообеспечения МДП также содержат CPU и MEM.

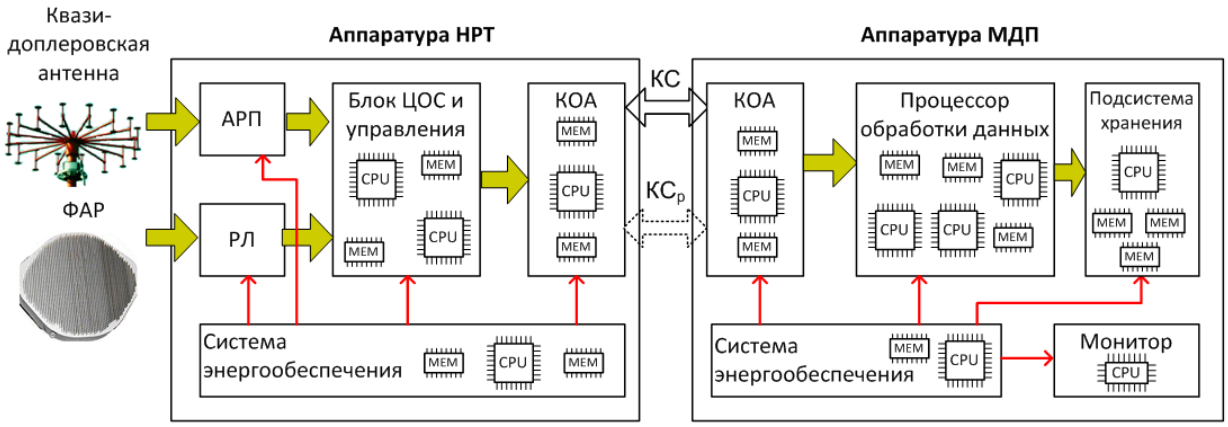


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия НРТ и МДП

Поскольку, как видно из рис. 2, аппаратура НРТ и МДП построена по принципу сложной многопроцессорной системы, целесообразно рассматривать подходы, ориентированные на СД распределенных микропроцессорных систем с каналами связи.

Аналитический обзор

Известен способ [2] определения технического состояния многопроцессорных вычислительных систем путем анализа графа синдромов. В нем определение исправных и неисправных CPU, представленных моделью Препарата-Метца-Чена (ПМЧ), осуществляется посредством предварительной идентификации хотя бы одного исправного, путем выделения и совместного анализа простых путей и двухвершинных подграфов. С помощью исправных CPU по таблице синдромов определяются неисправные и остальные – исправные. Концептуально такой способ подходит для СД процессорных модулей внутри МДП и НРТ.

В подходе [3] представлена организация распределенного СД технического состояния модулей и линий связи (ЛС) цифровых систем, использующая диагностическую модель Барси-Грандони-Маестрини (БГМ), где исправный модуль проверяет, находятся пути между исправными, проводится обработка и дешифрация результатов выполненных проверок. Представляется, что этим методом можно осуществлять СД РСН в целом, на системном уровне.

В [4] рассматриваются две модели (ПМЧ) для распределенных систем. При нарушении условия *t*-диагностирования, дешифрация синдрома выделяет минимальное число блоков, дополнительная проверка которых позволит однозначно определить техническое состояние. Модель позволяет задать критерии цикличности СД и определить максимально возможное число одновременно отказавших блоков РСН, при которых система остается диагностируемой.

Организация [5] диагностирования цифровых систем со структурой симметричного двудольного графа по модели БГМ и точностью до компонента (CPU, MEM, ЛС) использует равное число компонентов 2-х типов: CPU и MEM. На время диагностирования разнотипные устройства объединяются в проверяемые подсистемы одинакового состава. Такой метод можно рассмотреть для детального СД КОА РСН, однако не исключены сложности при его реализации.

В [6] и [13] предложен метод (модель БГМ) СД модулей и ЛС цифровых систем с реконфигурацией, допускающий устойчивые кратные отказы ограниченного числа компонентов. В основу [6] положен принцип расширяющихся областей. В [13] допускается еще одиночный отказ в процессе СД и осуществляется многократный запуск процесса со сравнением результатов двух последних. Метод [6] подходит для СД верхнего уровня РСН, так как адаптирован к изменчивости ее топологии. При использовании [13] в РСН для устранения отказавших компонентов необходимо предусмотреть смену рабочих конфигураций и скользящее резервирование.

В [7] на основе БГМ модели разработан подход к СД отказа в цифровых системах по принципу расширяющихся областей, допускающий устойчивые отказы ограниченного числа компонентов и один отказ за время диагностирования. В соответствие с подходом в РСН придется проводить двукратный запуск процесса СД со сравнением результатов.

В [8] представлен путевой метод СД (модель ПМЧ) технического состояния модулей и ЛС цифровых систем с использованием нулевых путей для выбора проверяющих модулей и передачи оценок результатов проверок. Сначала находятся исправные модули, затем запускается процесс СД состояния остальных компонентов. Метод следует учитывать при создании специального протокола передачи диагностических данных в КС РСН.

В [9] предложен выведенный из модели БГМ подход к организации параллельного контроля больших цифровых систем со структурой типа тороидальной решетки, выполняемого посредством 1) параллельной проверки компонентов подсистем первичной раскладки, 2) смежных с узлами первичной и включающих ЛС подсистем справа и снизу. Не смотря на различие в топологиях, последовательность операций этого подхода можно рассматривать при реализации алгоритмов контроля МДП, НРТ и КС в РСН.

В подходе [10] к СД (модель БГМ) устройств и ЛС неоднородных цифровых систем с равным числом CPU и MEM (проверяет CPU) связанные разнотипные устройства объединяются в подсистемы. Допускаются устойчивые отказы ограниченного числа компонентов, отказы во время СД не возникают. Имеющийся в системе диагностический монитор, инициирующий процессы контроля и СД можно использовать в МДП РСН.

В [11] рассматривается системное диагностирование по модели ПМЧ в присутствии множественных неисправностей, анализируются условия, при которых состояние каждого модуля определяется только по исходам тестирования физически связанных с ним модулей (условия самоопределимости). Введен класс локально (t_r/t)-диагностируемых систем, где t – кратность неисправностей, t_r - для которых обеспечивается определение состояния всех модулей системы. Интересной видится возможность обеспечить локальную диагностируемость элементов РНС путем введения избыточности по числу тестов.

В [12] рассмотрены оценки параметров N-модульных самодиагностируемых вычислительных систем с коммутируемым диагностическим графом и моделью ПМЧ. Получены верхние оценки для: $h \leq N+2t$, где h – число тестовых проверок, достаточных для идентификации состояний всех модулей, t – число неисправных модулей; $z=\log T$, где z – число тактов диагностического эксперимента, позволяющее идентифицировать исправный модуль, T – допустимое число неисправных модулей. Предложенный в подходе [12] алгоритм синтеза диагностического графа необходимо учесть при разработке алгоритмов СД РСН.

В [14] (модель ПМЧ) разработан способ восстановления работоспособности для отказоустойчивых цифровых систем с динамической избыточностью. Способ реконфигурации отказоустойчивого графа использует избыточные хорды для устранения влияния отказавших хорд. Создавая динамическую избыточность в топологии и компонентах РСН можно эффективно восстанавливать ее работоспособность путем однократного диагностирования отказавших компонент.

В [15] по модели ПМЧ исследуется СД модульных вычислительных систем при кратных неисправностях и ненадёжных тестах. Надежность теста, выполняемого неисправным модулем, можно обеспечить усложнением программно-аппаратной части РСН, что приведет к ее удорожанию и увеличению времени контроля, поскольку потребуется хранить эталон в устойчивой к отказам МЕМ и для сравнения применять аппаратуру повышенной надежности. Выявленный в подходе класс скоростных ненадёжных тестов позволяет улучшить показатели эффективности СД РСН.

Выводы

Все рассмотренные подходы основаны на 2-х моделях Препарата-Метца-Чена и Барси-Грандони-Маестрини, причем в модели ПМЧ процесс СД для выявления отказов выполняется один раз, в БГМ – многократно. Также можно выделить специализацию методов по применимости к определенным компонентам РСН:

– цифровые модули внутри НРТ и МДП;
– каналы связи;
– процессор МДП.

Более детально применение методов СД к элементам аппаратуры РСН на различных уровнях её иерархии показано в таблице 1.

Реализация модулей РСН на микропроцессорах и ПЛИС обеспечит их СД с заданными цикличностью, детализацией, и другими параметрами с возможностями диагностирования в режиме реального времени и адаптации к изменениям топологии и структуры РСН при её модификации или модернизации. Для сокращения времени СД и упрощения аппаратуры и программного обеспечения РСН рекомендуется применять ненадежные тесты.

Таблица 1 – Применение методов диагностирования к элементам РСН

Элемент РСН	Метод СД	Примечание
Топология РСН	3, 6, 12, 13, 14	СД верхнего уровня иерархии
НРТ	2, 4, 7	СД и диагностирование соседних НРТ
АРП	11	Аналоговые модули, имеют контрольные точки своего технического состояния
РЛ	11	
Блок ЦОС и управления	9, 10	Реализует алгоритмы СД НРТ
КОА НРТ	5, 10	СД каналов связи и блока ЦОС
Система энергообеспечения НРТ	9, 11	Диагностирует только себя
МДП	2, 4, 7	СД и диагностирование соседних НРТ напрямую и удаленных НРТ через соседние
КОА МДП	5, 10	СД каналов связи и процессора

Элемент РСН	Метод СД	Примечание
Процессор обработки данных	10	Реализует алгоритмы СД МДП и РСН
Подсистема хранения	11	Диагностируют только себя
Монитор	9, 10	
Система энергообеспечения МДП	9, 11	
Каналы связи	3, 6, 8, 13, 14	Передают, в том числе, диагностическую информацию

Литература

1. Аминев Д. А., Журков А. П., Козырев А. А., Увайсов С. У. Алгоритмы работы программного обеспечения микропроцессорных систем контроля аппаратуры пеленгаторной позиции // Труды НИИР. 2014. № 3. С. 11–17.

2. Пархоменко П. П. Определение технического состояния многопроцессорных вычислительных систем путем анализа графа синдромов // Автоматика и телемеханика. 1999, № 5, С. 126–134.

3. Ведешенков В. А. Организация самодиагностирования технического состояния цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 165–182.

4. Богданов Ю. Ю. О двух диагностических моделях распределенных цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 1986. № 8. С. 127–134.

5. Ведешенков В. А. Организация диагностирования цифровых систем со структурой симметричного двудольного графа // Проблемы управления. 2009. № 6. С. 59–67.

6. Ведешенков В. А. Самодиагностирование цифровых систем с реконфигурацией // Проблемы управления. 2003. № 4. С. 39–51.

7. Ведешенков В. А. Подход к самодиагностированию возникающего отказа в цифровых системах // Автоматика и телемеханика. 2005. № 4. С. 127–140.

8. Ведешенков В. А. Путевой метод самодиагностирования цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 2005. № 3. С. 154–168.

9. Ведешенков В. А. Подход к контролю больших цифровых систем со структурой типа тороидальной решетки // Проблемы управления. 2007. № 2. С. 35–39.

10. Ведешенков В. А. Подход к самодиагностированию неоднородных цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 2006. № 1. С. 162–177.

11. Димитриев Ю. К. Частичное и полное локальное диагностирование в вычислительных системах с циркулянтной структурой // Автоматика и телемеханика. 2008. № 7. С. 136–145.

12. Белявский В. Е., Валуйский В. Н., Романкевич А. М., Романкевич В. А. Самодиагностируемые многомодульные системы: некоторые оценки тестирования // Автоматика и телемеханика. 1999. № 8. С. 148–153.

13. Ведешенков В. А. Самодиагностирование возникающих отказов и их устранение в цифровых системах с реконфигурацией // Проблемы управления. 2004. № 3. С. 48–61.

14. Ведешенков В. А. Процедура восстановления работоспособности отказоустойчивых цифровых систем с динамической избыточностью // Автоматика и телемеханика. 2003. № 5. С. 167–179.

15. Димитриев Ю. К., Задорожный А. Ф. Применение ненадёжных тестов для самодиагностики модульных вычислительных систем при кратных отказах // Математические основы надёжности вычислительных и управляющих систем. 2010. № 2. С. 59–73.

References

1. Aminev D. A., Zhurkov A. P., Kozyrev A. A., Uvaysov S. U. Algoritmy raboty programmnogo obespechenija mikroprocessornyh sistem kontrolja apparatury pelengatornoj pozicii [The algorithms used in the software of microprocessor systems monitoring equipment direction finding position]. *Trudy NIIR*, 2014, no. 3, pp. 11–17 (in Russian).

2. Parhomenko P. P. Checking multiprocessor computer systems for serviceability by analyzing their syndrome graphs. *Automation and Remote Control*, 1999, no. 5, pp. 126–134 (in Russian).

3. Vedeshenkov V. A. Self-Diagnosis of Digital Systems. *Automation and Remote Control*, 2003, no. 11, pp. 1794–1809.

4. Bogdanov Yu. Yu. Two diagnostic models of distributed digital systems. *Automation and Remote Control*, 1986, no. 8, pp. 127–134 (in Russian).

5. Vedeshenkov V. A. Organization of diagnosing of digital systems with symmetric bipartite graph structures. *Control Sciences*, 2009, no. 6, pp. 59–67 (in Russian).

6. Vedeshenkov V. A. System-level self-diagnosis of reconfigurable systems. *Control Sciences*, 2003, no. 4, pp. 39–51 (in Russian).

7. Vedeshenkov V. A. An approach to self-diagnosis of a newly developed fault in digital systems. *Automation and Remote Control*, 2005, no. 4, pp. 620–632.

8. Vedeshenkov V. A. A route-oriented self-diagnosis method for digital systems. *Automation and Remote Control*, 2005, no. 3, pp. 479–491.

9. Vedeshenkov V. A. An approach to checking large-scale digital systems with toroidal grid-type structure. *Control Sciences*, 2007, no. 2, pp. 35–39 (in Russian).

10. Vedeshenkov V. A. An approach to self-diagnosis of nonuniform digital systems. *Automation and Remote Control*, 2006, no. 1, pp. 148–160.

11. Dimitriev Yu. K. Partial and complete local diagnosis in computer systems with circulant structure. *Automation and Remote Control*, 2008, no. 7, pp. 1223–1230.

12. Belyavskiy V. E., Valuiskii V. N., Romankevich A. M., Romankevich V. A. Self-diagnosable multimodular systems: some estimates of testing. *Automation and Remote Control*, 1999, no. 8, pp. 148–153 (in Russian).

13. Vedeshenkov V. A. System-level self-diagnosis of arising faults and their elimination in reconfigurable systems. *Control Sciences*, 2004, no. 3, pp. 48–61 (in Russian).

14. Vedeshenkov V. A. Operability Restoration Procedure for Fault-Tolerant Digital Systems with Dynamic Redundancy. *Automation and Remote Control*, 2003, no. 5, pp. 824–834.

15. Dimitriev Yu. K., Zadorozhny A. F. Application of unreliable tests for self-diagnostics of modular computing systems at multiple faults. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*, 2010, no. 2, pp. 59–73 (in Russian).

Статья поступила 23 октября 2015 г.

Информация об авторах

Журков Александр Петрович – аспирант Департамента электронной инженерии. Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики. Область научных интересов: диагностирование радиотехнических систем; системы управления связью. E–mail: petrovyc@gmail.com

Адрес: 123458, Россия, г. Москва, Таллинская ул., д. 34.

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

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

Мирошниченко Сергей Сергеевич – 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: lurokpro@gmail.com

Петросян Петр Арамович – 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: petrosyan-petr@mail.ru

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

Analysis of the Possibilities of Self-Diagnosis Approaches to Distributed Electronic Surveillance System

A. P. Zhurkov, D. A. Aminev, P. A. Guseva,
S. S. Miroshnichenko, P. A. Petrosjan

Formulation of the problem: *in spite of the rapid development of global navigation satellite positioning systems, video surveillance and machine vision, radar and radio direction finding is widely used now, as in remote and underdeveloped areas of radar and show no automatic radio direction finders (RDF) is one of the main means of ensuring flights. Distributed radio system monitoring (RSM) consists of equipment local control point (LCP), communication channels and maintenance-free radio terminals (MRT), which, depending on the conditions of accommodation can be removed from the MRT over distances up to several hundred kilometers. Therefore, problem diagnosis and failure detection MRT and all RSM as a whole is actual.* ***The aim is*** *to search and study of scientific and methodical approaches of diagnosing complex distributed, multiprocessor computers and radio systems for their use in the task of creating a method and a mathematical model of the automated diagnosis of spatially distributed RSN. We consider the basic theory of diagnosing distributed radio, digital and multi-processor systems. Is a summary of selected approaches and their application with respect to the RSM.* ***Result:*** *Draw localization and identified conceptually the approach to certain elements distributed RSM – RDF, radar, blocks of digital data processing and control, power systems, channel-forming equipment, communication channels and so on.*

Keywords: *diagnostics, radio system, a communications network, the mathematical apparatus, control, microprocessor, memory, communication channel, radio direction finding, radar.*

Information about Authors

Aleksandr Petrovich Zhurkov - The postgraduate student of the Department of Electronic Engineering. Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University Higher School of Economics. Field of research: diagnostics of technical systems; communication control system. E–mail: petrovyc@gmail.com

Address: Russia, 123458, Moscow, ul. Tallinskaya, 34.

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

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

Sergej Sergeevich Miroshnichenko – 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. Tel.:

E–mail: lurokpro@gmail.com

Petr Aramovich Petrosjan – 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: petrosyan-petr@mail.ru

Address: Russia, 105005, Moscow, ul. Baumanskaya 2-ya, 5.

УДК 62-50; 519.7; 519.8

Интервальный подход к оптимизации в условиях неопределенности

Левин В. И.

Актуальность. *В статье рассмотрены существующие подходы к актуальной проблеме оптимизации систем в условиях неопределенности. Дана точная постановка задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров целевой функции и ограничений. В связи с этим изложены математическая теория сравнения интервалов, включающая точное определение максимального и минимального интервалов, условия существования таких интервалов и алгоритмы их отыскания.* ***Цель статьи.*** *Целью является изложение идеи решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров. Эта идея основана на правилах математической теории сравнения интервалов, позволяющих заменить сравнение интервалов и выделение максимального и минимального интервала сравнением их нижних и верхних границ.* ***Метод.*** *На базе предложенной идеи сформулирован и обоснован метод детерминизации, позволяющий решить задачу условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров путем ее сведения к двум полностью определенным задачам оптимизации того же типа.* ***Новизна.*** *Сформулирована и доказана теорема, определяющая решение задачи условной оптимизации в условиях интервальной неопределенности параметров через решения двух полностью определенных задач оптимизации. Также сформулирована и доказана теорема, определяющая необходимое и достаточное условие существования решения задачи условной оптимизации в условиях интервальной неопределенности.* ***Результат.*** *Построен 4-шаговый алгоритм решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров, который реализует метод детерминизации. Приведен пример работы алгоритма; в качестве решаемой задачи выбрана интервальная задача о назначениях. Проведено сравнение предложенного подхода к решению задач условной оптимизации с неполностью определенными параметрами с другими методами (детерминированный, вероятностный и нечеткий). Указаны достоинства и недостатки различных методов. Подчеркнуто, что предложенный подход позволяет сводить оптимизацию неполностью определенных функций к оптимизации полностью определенных функций строго математически, а не эвристически, как это делается в других известных подходах.*

Ключевые слова: *оптимизация, неопределенность, оптимизация при интервальной неопределенности, метод детерминизации.*

Введение

Задачи оптимизации имеют большое прикладное значение: на базе их строятся методы оптимального проектирования различных систем – технических, экономических, социальных и т.д., обеспечивающие достижение наилучшего, в определенном смысле, результата работы создаваемой системы. В связи с этим к настоящему времени создано огромное число методов решения задач оптимизации, как универсальных, рассчитанных на применение к задачам различных классов, так и специализированных, позволяющих эффективно решать лишь узкие классы задач [1–6] (см. также работы автора последних лет [7–12]).

Однако, при всем различии существующих методов, большинство их имеют одно общее свойство – применимость только к тем задачам оптимизации, в которых оптимизируемая функция известна точно (детерминирована). Между тем, встречающиеся на практике задачи оптимизации и оптимального проектирования обычно таковы, что их оптимизируемые функции известны не

точно, а с той или иной степенью неопределенности (недетерминированы). Это вызвано теми фактами, что

1) большинству реальных процессов свойственна естественная неопределенность;
2) параметры большинства систем вследствие погрешности вычислений и измерений известны неточно;
3) многие параметры систем изменяются во времени.

В связи с этим возникает проблема оптимизации неполностью определенных (недетерминированных) функций. Эта проблема достаточно сложна по сравнению с традиционной оптимизацией полностью определенных функций, поскольку для нее дополнительно необходимо:

1) обобщить понятие экстремума функции;
2) выяснить условия существования такого экстремума, связанные с ее недетерминированностью;
3) разработать специальные методы поиска экстремума таких функций.

Реально эта проблема еще сложнее, поскольку имеющаяся информация об оптимизируемой функции может быть не только неполностью определенной, но и неоднозначной, неточной, противоречивой и т.д. В такой ситуации многие авторы считают, что модели для описания сложных систем могут быть только смысловыми, носящими содержательно-описательный, словесный характер. Такой взгляд представляется нам не вполне логичным. Действительно, математика, как хорошо известно, строится как полностью определенная, однозначная, точная и непротиворечивая наука. И поэтому правильное применение математики к описанию сложных систем – неопределенных, противоречивых, неточных, неоднозначных и т.д. – вполне может давать адекватные математические модели этих систем, лишенные неопределенности, неоднозначности, неточности и противоречивости. Для этого требуется всего лишь подобрать математический аппарат, который позволяет оперировать с неопределенностью и другими НЕ-свойствами исследуемой системы так же точно и однозначно, как классическая математика оперирует с полностью определенными системами.

Имеются различные подходы к нахождению оптимума неполностью определенных (недетерминированных) функций, различающиеся достоинствами и недостатками [13].

Первый подход – детерминированный – состоит в решении задач оптимизации для определенных значений или сочетаний значений параметров оптимизируемой функции, взятых внутри заданных областей их неопределенности [13]. Например, можно взять наихудшее сочетание значений параметров внутри областей неопределенности (пессимистический подход) [13–16], наилучшее сочетание (оптимистический подход) [17], центры (середины) областей неопределенности параметров (центральный подход) [18] и др. Основное достоинство этого подхода – простота интерпретации полученного решения, основной недостаток – слабо мотивированная ориентировка на какое-

то одно значение (сочетание значений) параметров, которое на практике реализуется редко, что может обернуться неоправданной сложностью решения.

Второй подход – вероятностный – состоит в решении задачи оптимизации для усредненных (ожидаемых, в смысле математического ожидания) значений параметров оптимизируемой функции или для таких значений параметров, которые обеспечивают достаточно высокую вероятность получения оптимума [19–22]. Этот подход предполагает задание вероятностных распределений указанных параметров внутри областей их неопределенности. Основное достоинство этого подхода – ориентировка получаемого решения хотя и на одно, но зато наиболее часто встречающееся (наиболее подходящее для получения оптимума) значение (сочетание значений) параметров функции, основной недостаток – необходимость знания вероятностных распределений параметров, что зачастую бывает невозможно.

Третий подход – нечеткий – идейно близок второму, но вместо вероятностных распределений параметров оптимизируемой неполностью определенной функции, являющихся объективными характеристиками значений этих параметров, используются нечеткие распределения параметров, получаемые экспертным путем, т.е. субъективно [18].

В работах [23–31] был предложен и детально описан применительно к различным оптимизационным задачам детерминизационный подход к нахождению оптимума неполностью определенных функций. Данный подход принципиально отличается от трех предыдущих тем, что оптимизация неполностью определенной функции ведется с учетом всего множества возможных значений недетерминированных параметров функции.

Указанный подход позволяет для любой функции, неопределенность которой заключается в том, что ее параметры известны лишь с точностью до интервалов возможных значений, свести нахождение оптимума такой функции к нахождению одноименных оптимумов двух полностью определенных функций. Таким образом, для нахождения оптимума неполностью определенных функций становится возможно применять многочисленные хорошо известные и эффективно работающие методы точного нахождения оптимума полностью определенных (детерминированных) функций. При этом собственно сам алгоритм нахождения оптимума неполностью определенной функции оказывается полностью определенным, точным, однозначным и непротиворечивым. Другой причиной выбора неопределенности именно интервального типа было то, что интервальные оценки неизвестных параметров систем наиболее просты и доступны для получения. В этом и заключаются основные достоинства предложенного нами подхода к оптимизации неполностью определенных функций – метода детерминизации.

Разумеется, у этого метода есть другие достоинства, а также недостатки. Они подробно рассмотрены в п. 5.

Детерминизационный подход к оптимизации неполностью определенных функций излагается и обосновывается в настоящей статье в наиболее общем виде, не зависящем от особенностей оптимизируемых функций.

1. Постановка задачи

Будем рассматривать следующую ситуацию. Пусть задана некоторая произвольная непрерывная функция n переменных

$$y = F(x_1,..., x_n), \tag{1}$$

все параметры явного представления которой известны точно, и пусть она существует в области, определяемой системой ограничений

$$\Phi_i(x_1,..., x_n) \le b_i, \quad i = \overline{1,m}\}. \tag{2}$$

Тогда для функции (1) можно сформулировать полностью определенную задачу условной оптимизации

$$F(x_1,\ldots,x_n) = \max, \text{ при } \Phi_i(x_1,\ldots,x_n) \le b_i, i = \overline{1,m}\}. \tag{3}$$

Конечно, возможен вариант задачи (3), где необходимо не максимизировать, а минимизировать функцию F. В современном математическом программировании разработано множество различных методов эффективного решения задач (3), ориентирующихся на тип функций F и $\Phi_i, i = \overline{1,m}$.

Пусть теперь параметры $p_k, k = \overline{1,l}$ явного представления функции F известны не точно, а с точностью до интервалов своих значений, т.е. имеют вид интервалов $\tilde{p}_k = [p_{k1}, p_{k2}]$. Пусть аналогичным образом неточно заданы параметры q_s явного представления функций Φ_i в левых частях ограничений и параметры b_i в правых частях, т.е. $\tilde{q}_{si} = [q_{si1}, q_{si2}], s = \overline{1,t}, \tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}], i = \overline{1,m}$. Тогда функции F и $\Phi_i, i = \overline{1,m}$, становятся интервальными (т.е. принимающими вид интервалов $\tilde{F}$ и $\tilde{\Phi}_i, i = \overline{1,m}$), определяемыми с точностью до интервалов возможных значений, равно как и параметры $b_i, i = \overline{1,m}$ (т.е. принимающие вид интервалов $\tilde{b}_i, i = \overline{1,m}$). В итоге полностью определенная задача условной оптимизации (3) переходит в неполностью определенную – интервальную задачу условной оптимизации

$$\tilde{F}(x_1,\ldots,x_n) = \max, \text{ при } \tilde{\Phi}(x_1,\ldots,x_n) \le \tilde{b}_i, i = \overline{1,m}\}. \tag{4}$$

Конечно, возможен вариант задачи (4), где требуется не максимизировать, а минимизировать функцию $\tilde{F}$. Итак, необходимо разработать методику решения оптимизационной задачи вида (4).

2. Математика сравнения интервалов

В основе решения поставленной выше интервальной задачи условной оптимизации (4) лежит математическая теория сравнения интервалов.

Рассмотрим два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$. Попытаемся сравнить их по величине, рассматривая их как интервальные числа. Первый вариант такого сравнения – сравнить интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ на основе отношений в отдельных парах вещественных чисел (a_i, b_j), где $a_i \in \tilde{a}, b_j \in \tilde{b}$. Но такой подход сразу ведет к провалу, поскольку в общем случае, при произвольных интервалах $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$, некоторые пары интервалов (a_i, b_j) будут находиться в отношении $a_i > b_j$, а

другие – в противоположном отношении $a_i < b_j$. По этой причине единственное, что нам остается, – реализовать сравнение интервалов на теоретико-множественном уровне, рассматривая их как единое целое, которое не подлежит дроблению на более мелкие части. Этот путь был реализован автором статьи в 1990-е годы. Ниже приводится краткое изложение полученных результатов [32–35].

Операции взятия максимума $\vee$ и минимума $\wedge$ двух интервалов $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ введем в виде теоретико-множественных конструкций

$$\tilde{a} \vee \tilde{b} = \{a \vee b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \quad \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \{a \wedge b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \tag{5}$$

Согласно (5), взятие максимума (минимума) интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ есть нахождение максимума (минимума) двух точечных величин a и b при условии, что конкретные значения величин пробегают все возможные значения из интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ соответственно. Для того, чтобы интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ можно было сравнить по величине, установив их отношение $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо, во-первых, чтобы введенные операции $\vee, \wedge$ над этими интервалами существовали, во-вторых, чтобы эти операции давали своим результатом один из операндов – $\tilde{a}$ или $\tilde{b}$, и в-третьих, чтобы эти операции являлись согласованными в том смысле, что если большим (меньшим) является один из интервалов, то меньшим (большим) является другой. Сформулированное условие сравнимости интервалов по величине является, очевидно, не только необходимым, но и достаточным.

К счастью, легко доказать, что условие согласованности $\vee$ и $\wedge$ над интервалами выполняется для любой пары интервалов $(\tilde{a}, \tilde{b})$. Очевидно также, что всегда выполняется условие существования введенных операций взятия максимума $\vee$ и минимума $\wedge$ двух интервалов, причем результатом операции оказывается некоторый, в общем случае, новый интервал. Таким образом, необходимым и достаточным условием сравнимости $\tilde{a}$ 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 $\tilde{b}$. Последняя формулировка условия сравнимости интервалов открывает возможность получения его в конструктивной форме, пригодной для практического применения. Основной результат здесь формулируется следующим образом.

Теорема 1. Для того, чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ являлись сравнимыми по величине (по отношению $\geq$) и находились при этом в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы границы этих интервалов подчинялись следующим условиям

$$a_1 \geq b_1, \quad a_2 \geq b_2, \tag{6}$$

а для того, чтобы они были сравнимы по величине (отношению $\leq$) и находились в отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \leq b_1, \quad a_2 \leq b_2. \tag{7}$$

Эта теорема говорит, что интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ являются сравнимыми по отношению $\geq$ или $\leq$ (и находятся именно в этом отношении) только в том случае, когда в таком же отношении находятся одноименные границы этих интервалов a_1, b_1 и a_2, b_2. Иными словами, два интервала $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ находятся в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ только тогда, когда $\tilde{a}$ сдвинут обеими своими границами вправо относительно $\tilde{b}$ и в отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ только тогда, когда интервал $\tilde{a}$ сдвинут обеими границами влево относительно $\tilde{b}$.

Значение вышеприведенной теоремы 1 заключается в том, что она сводит сравнение двух интервалов и выбор большего (меньшего) из них к сравнению их одноименных границ, являющихся обычными числами. Так разрешается проблема сравнения интервалов.

Теорема 2. 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 $\geq$ и $\leq$), т.е. не находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \quad \text{или} \quad (b_1 < a_1, b_2 > a_2). \tag{8}$$

Эта теорема показывает, что интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ не сравнимы по отношению $\geq$ и $\leq$ лишь тогда, когда один из них полностью накрывает другой.

Результат теоремы 2 заключается в том, что она показывает существование случаев несравнимости интервалов по отношениям $\geq$ и $\leq$, в отличие от вещественных чисел, которые всегда сравнимы по этим отношениям. Несравнимость величин некоторых интервалов есть естественный результат того факта, что интервальные числа, в отличие от вещественных, задаются не точно, а с некоторой неопределенностью (например, известно, что число принимает некоторое значение в данном интервале, но не уточняется, какое именно это значение). На основе теорем 1, 2 можно доказать нижеследующие положения.

Теорема 3. Для того, чтобы существовал максимальный интервал в некоторой системе интервалов $\tilde{a}(1) = [a_1(1), a_2(1)]$, $\tilde{a}(2) = [a_1(2), a_2(2)], \ldots$ (который находится со всеми остальными интервалами в отношении $\geq$), необходимо и достаточно, чтобы его границы относительно одноименных границ остальных интервалов были расположены согласно следующим условиям

$$\left.\begin{array}{l} a_1(1) \geq a_1(2),\ a_1(1) \geq a_1(3), \ldots \\ a_2(1) \geq a_2(2),\ a_2(1) \geq a_2(3), \ldots \end{array}\right\}. \tag{9}$$

Здесь необходимо сделать уточнение, что условия (9) даны конкретно для того случая, когда максимальным является интервал $\tilde{a}(1)$. Однако хорошо видно, что эта конкретизация не ограничивает общности.

Теорема 4. Для того, чтобы существовал минимальный интервал в некоторой системе интервалов $\tilde{a}(1) = [a_1(1), a_2(1)]$, $\tilde{a}(2) = [a_1(2), a_2(2)], \ldots$ (который находится со всеми остальными интервалами в отношении $\leq$), необходимо и достаточно, чтобы его границы относительно одноименных границ остальных интервалов были расположены согласно следующим условиям

$$\left.\begin{array}{l} a_1(1) \leq a_1(2),\ a_1(1) \leq a_1(3), \ldots \\ a_2(1) \leq a_2(2),\ a_2(1) \leq a_2(3), \ldots \end{array}\right\}. \tag{10}$$

Аналогично теореме 3 условия (10) заданы для случая, когда минимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что не ограничивает общности.

Вышеприведенные теоремы 3, 4 показывают нам, что интервал является максимальным (минимальным) среди множества имеющихся интервалов только в том случае, когда максимальны (минимальны) его нижняя граница среди нижних границ всех интервалов, а его верхняя граница среди верхних границ всех интервалов.

4. Идея решения

В задаче (4) целевая функция $\tilde{F}(x_1,...,x_n)$, функции $\tilde{\Phi}_i(x_1,...,x_n), i=\overline{1,n}$, в левых частях ограничений и параметры $\tilde{b}_i, i=\overline{1,m}$, в правых частях являются интервальными и поэтому могут быть записаны в виде интервалов

$$\begin{aligned} &\tilde{F}(x_1,...,x_n)=[F_1(x_1,...,x_n),F_2(x_1,...,x_n)], \\ &\tilde{\Phi}_i(x_1,...,x_n)=[\Phi_{i1}(x_1,...,x_n),\Phi_{i2}(x_1,...,x_n)], \quad i=\overline{1,m}, \\ &\tilde{b}_i=[b_{i1},b_{i2}], \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad i=\overline{1,m}. \end{aligned} \tag{11}$$

После этого интервальную задачу условной оптимизации (4) можно записать в явном интервальном виде

$$\begin{aligned} &[F_1(x_1,...,x_n),F_2(x_1,...,x_n)]=\max, \\ &[\Phi_{i1}(x_1,...,x_n),\Phi_{i2}(x_1,...,x_n)]\le[b_{i1},b_{i2}], \quad i=\overline{1,m}, \end{aligned} \tag{12}$$

который уже поддается решению с помощью каких-либо известных методов оптимизации. Действительно, согласно теореме 3 интервальное уравнение в верхней строке сформированной выше системы (12) можно записать в виде эквивалентной пары обычных (детерминированных) уравнений

$$F_1(x_1,...,x_n)=\max, \quad F_2(x_1,...,x_n)=\max. \tag{13}$$

Далее, согласно теореме 1, систему интервальных неравенств в задаче условной оптимизации (12) можно записать в виде эквивалентной системы обычных (детерминированных) неравенств

$$\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)\le b_{i1}, \ \Phi_{i2}(x_1,...,x_n)\le b_{i2}, \quad i=\overline{1,m}. \tag{14}$$

Закончим это построение следующим очевидным образом. Рассматривая совместно пару детерминированных уравнений оптимизации (13) с системой неравенств-ограничений (14), имеем две детерминированные задачи условной оптимизации вида (3). При этом задачу (15) естественно назвать нижней граничной задачей исходной интервальной задачи (4), а задачу (16) – ее верхней граничной задачей.

$$\begin{aligned} &F_1(x_1,...,x_n)=\max, \\ &\left.\begin{aligned} &\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)\le b_{i1}, i=\overline{1,m}, \\ &\Phi_{i2}(x_1,...,x_n)\le b_{i2}, i=\overline{1,m}, \end{aligned}\right\} \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} &F_2(x_1,...,x_n)=\max, \\ &\left.\begin{aligned} &\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)\le b_{i1}, i=\overline{1,m}, \\ &\Phi_{i2}(x_1,...,x_n)\le b_{i2}, i=\overline{1,m}. \end{aligned}\right\} \end{aligned} \tag{16}$$

Из построения видно, что пара задач (15), (16), рассматриваемых в совокупности, эквивалентна исходной интервальной задаче (4). Таким образом, для получения решения задачи (4) надо решить ее нижнюю (15) и верхнюю (16)

граничные задачи. В общем случае решения нижней и верхней задач: $\{M_{\text{н}}(x), F_{1,\max}\}, \{M_{\text{в}}(x), F_{2,\max}\}$, где $M_{\text{н}}(x), M_{\text{в}}(x)$ – множества точек решений $x=(x_1, ..., x_n)$ нижней и верхней граничной задачи, $F_{1,\max}, F_{2,\max}$ – полученные максимальные значения целевых функций этих задач. Решение задачи (4) составляется из решений ее нижней и верхней граничных задач в виде

$$\{x^* \in M_{\text{н}}(x) \cap M_{\text{в}}(x),\ \tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]\}. \tag{17}$$

В качестве точки решения x^* в (17) берется любая точка из пересечения множеств $M_{\text{н}}(x), M_{\text{в}}(x)$, а в качестве максимального значения целевой функции $\tilde{F}_{\max}$ интервал от максимума целевой функции нижней граничной задачи $F_{1,\max}$ до максимума целевой функции верхней граничной задачи $F_{2,\max}$.

Очевидно, что преимущество нашего подхода к решению интервальной задачи условной оптимизации заключается в возможности применения традиционных, хорошо разработанных методов решения детерминированных задач оптимизации. Основанный на этом подходе метод решения является методом детерминизации, так как он сводит решение недетерминированной задачи (4) к решению двух детерминированных задач (15) и (16).

4. Алгоритм решения

Для решения интервальной задачи (4) методом детерминизации необходимо действовать по следующему алгоритму.

Шаг 1. Используя формулы интервальной математики, выражающие элементарные преобразования интервалов [18]

$$\begin{aligned}
&[a_1,a_2]+[b_1,b_2]=[a_1+b_1,a_2+b_2]; \quad [a_1,a_2]-[b_1,b_2]=[a_1-b_2,a_2-b_1];\\
&k[a_1,a_2]=\begin{cases}[ka_1,ka_2], & k>0,\\ [ka_2,ka_1], & k<0;\end{cases}\\
&[a_1,a_2]\cdot[b_1,b_2]=[\min_{i,j}(a_i\cdot b_j),\max_{i,j}(a_i\cdot b_j)];\\
&[a_1,a_2]/[b_1,b_2]=[a_1,a_2]\cdot[1/b_2,1/b_1],
\end{aligned} \tag{18}$$

представляем целевую функцию $\tilde{F}$ и функции ограничений $\tilde{\Phi}_i$ задачи (4) в интервальной форме. Так же представляем параметры $\tilde{b}_i$ в ограничениях задачи. Полученные представления имеют вид (11).

Шаг 2. Подставляя интервальные представления целевой функции, функции ограничений, а также параметров, полученные на шаге 1, формируем нижнюю граничную (15) и верхнюю граничную (16) задачи интервальной задачи условной оптимизации (4).

Шаг 3. Используя известные методы решения детерминированных задач условной оптимизации, получаем решения нижней $\{M_{\text{н}}(x), F_{1,\max}\}$ и верхней $\{M_{\text{в}}(x), F_{2,\max}\}$ граничных задач. При этом $M_{\text{н}}(x)$ – множество точек решения $x=(x_1,...,x_n)$ нижней граничной задачи, на котором ее целевая функция F_1 достигает своего максимума $F_{1,\max}$ и аналогично, $M_{\text{в}}(x)$ – множество точек

решения $x=(x_1,...,x_n)$ верхней граничной задачи, в которых ее целевая функция F_2 достигает максимума $F_{2,\max}$.

Шаг 4. Выбрав в качестве точки решения интервальной задачи (4) любую точку x^* из пересечения множеств $M_{\text{н}}(x)$ и $M_{\text{в}}(x)$ точек решения нижней и верхней граничных задач и взяв в качестве нижней границы максимума $\tilde{F}_{\max}$ интервальной целевой функции $\tilde{F}$ задачи (4) максимум $\tilde{F}_{1,\max}$ целевой функции нижней граничной задачи, а в качестве верхней границы максимума $\tilde{F}_{\max}$ целевой функции $\tilde{F}$ задачи (4) соответственно максимум $\tilde{F}_{2,\max}$ целевой функции верхней граничной задачи, получаем полное решение интервальной задачи (4) в виде (17).

Пример (интервальный вариант задачи о назначениях). Пусть в организации имеются три работы и три исполнителя – кандидата на выполнение этих работ. Заданы издержки $\tilde{a}_{ij}=[a_{1,ij},a_{2,ij}]$ выполнения любой j-й работы любым i-м исполнителем $(i,j=\overline{1,3})$, представляющие собой интервалы и составляющие матрицу $\tilde{A}=\|\tilde{a}_{ij}\|=\|[a_{1,ij},a_{2,ij}]\|=[A_1,A_2]$, где $A_1=\|a_{1,ij}\|$ и $A_2=\|a_{2,ij}\|$ – нижняя и верхняя граничные матрицы издержек. Нужно распределить работы между исполнителями таким образом, чтобы каждый из них был занят выполнением ровно одной работы, а суммарные издержки были минимальны.

Для моделирования задачи введем множество неизвестных булевых матриц назначений $X=\|x_{ij}\|, x_{ij}\in\{0,1\}$, где $x_{ij}=1$, если i-й исполнитель выполняет j-ю работу, и $x_{ij}=0$ в противном случае. Тогда имеем

$$\tilde{F}(x_{ij})\equiv\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\tilde{a}_{ij}x_{ij}=\min,\quad \text{при}$$

$$\Phi_1(x_{ij})\equiv\sum_{i=1}^{3}x_{ij}=1,\quad j=\overline{1,3},\qquad \Phi_2(x_{ij})\equiv\sum_{j=1}^{3}x_{ij}=1,\quad i=\overline{1,3}.$$

Эта задача представляет собой частный случай общей интервальной задачи условной оптимизации (4). Поэтому для ее решения мы можем применить 4-шаговый алгоритм, описанный выше.

Шаг 1. С помощью формул (18) представляем целевую функцию нашей задачи $\tilde{F}$ в интервальной форме

$$\tilde{F}(x_{ij})\equiv\left[\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}a_{1,ij}x_{ij},\ \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}a_{2,ij}x_{ij}\right].$$

Представлять в интервальной форме функции $\tilde{\Phi}_1(x_{ij}),\tilde{\Phi}_2(x_{ij})$ ограничений задачи и параметры в правых частях ограничений не надо, т.к. в них не фигурируют интервальные параметры.

Шаг 2. Используя полученные на шаге 1 представления, формируем нижнюю граничную и верхнюю граничную задачи решаемой нами интервальной задачи условной оптимизации:

$$F_1(x_{ij})\equiv\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}a_{1,ij}x_{ij}=\min,\quad \text{при}\quad \sum_{i=1}^{3}x_{ij}=1,\quad j=\overline{1,3},\quad \sum_{j=1}^{3}x_{ij}=1,\quad i=\overline{1,3},$$

$$F_2(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} a_{2,ij}x_{ij} = \min, \quad \text{при} \quad \sum_{i=1}^{3} x_{ij} = 1, \quad j=\overline{1,3}, \quad \sum_{j=1}^{3} x_{ij} = 1, \quad i=\overline{1,3}.$$

Шаг 3. Решаем нижнюю и верхнюю граничную задачи интервальной задачи, сформированные на предыдущем шаге, принимая следующее конкретное числовое значение интервальной матрицы издержек

$$\tilde{A} = [A_1, A_2], \quad \text{где} \quad A_1 = \|a_{1,ij}\| = \begin{Vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{Vmatrix}, \quad A_2 = \|a_{2,ij}\| = \begin{Vmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 3 \\ 3 & 4 & 4 \end{Vmatrix}.$$

Имеется всего 6 различных значений матриц неизвестных $X = \|x_{ij}\|$, удовлетворяющих ограничениям решаемой задачи. Поэтому решение легко ищется перебором на множестве этих матриц. В итоге получаем решение нижней граничной задачи в виде $\{M_{\text{н}}(x), F_{1,\min}\}$, где множество решений $M_{\text{н}}$

$$M_{\text{н}}(x) = \left\{ X_{1a} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}, \quad X_{1b} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix}, \quad X_{1c} = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}, \quad X_{1d} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix} \right\},$$

а достигнутое минимальное значение целевой функции $F_{1,\min} = 5$. Далее, получаем решение верхней граничной задачи $\{M_{\text{в}}(x), F_{1,\min}\}$: множество решений

$$M_{\text{в}}(x) = \left\{ X_{2a} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix}, \quad X_{2b} = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \right\},$$

а соответствующее достигнутое минимальное значение целевой функции верхней граничной задачи составляет $F_{2,\min} = 9$.

Шаг 4. Находим пересечение множеств решений нижней $M_{\text{н}}(x)$ и верхней $M_{\text{в}}(x)$ граничных задач. Оно состоит из одной матрицы назначений

$$X^* = X_{1b} = X_{2a} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix},$$

которая есть решение всей задачи. Наконец, находим достигнутое на этом решении минимальное значение заданной интервальной целевой функции, в нашем случае оно представляет собой интервал $\tilde{F}_{\min} = [F_{1,\min}, F_{2,\min}] = [5, 9]$.

Итак, оптимальное решение интервальной задачи следующее: назначить 1-го исполнителя на 1-ю работу, 2-го – на 3-ю, 3-го – на 2-ю. Издержки имеют минимальное значение $[5, 9]$. Еще примеры см. в [13–15, 21, 25].

5. Сравнение предлагаемого подхода с существующими

Как было сказано во введении, оптимизация неполностью определенных функций, по сравнению с традиционной оптимизацией полностью определенных функций, требует дополнительно

1) обобщения понятия экстремума функции;
2) выяснения условий существования экстремума функций, связанных с ее неполной определенностью;
3) разработки специальных методов поиска экстремума таких функций.

Именно по этой схеме разработан предлагаемый в статье детерминизационный подход к оптимизации. Конкретно, обобщение понятия экстремума функции на случай неполностью определенных (интервальных) функций дано в п. 2 (формулы (5)). Далее, условия существования (несуществования) экстремума интервальной функции приведены в теоремах 1–4 того же п. 2. Наконец, специальный метод поиска экстремума интервальной функции разработан в п. 4. Необходимость проведения этой работы очевидна. Действительно, оптимизация полностью определенных функций основана на сравнении вещественных чисел, с выделением большего и меньшего, причем на вещественной оси большее число сдвинуто вправо относительно меньшего. Однако для оптимизации неполностью определенных функций такой подход не работает, т.к. неполностью определенные числа (например, интервальные), в отличие от вещественных, в общем случае не находятся в отношении «сдвинуто вправо (влево) на вещественной оси» и потому не могут сравниваться непосредственно, с выделением большего и меньшего числа. Вследствие этого для таких функций и приходится обобщать понятие экстремума. Далее, неполнота информации, которой характеризуются неполностью определенные числа и функции, при достижении определенного уровня может привести к ситуации несравнимости таких чисел и невозможности выделить из них большее и меньшее и, как следствие, – к отсутствию экстремума таких функций. В связи с этим и возникает необходимость нахождения условий существования экстремума неполностью определенных функций. Наконец, вследствие иного, более общего, чем для полностью определенных функций, понятия экстремума неполностью определенной функции и возможности несуществования этого экстремума, вызванной неполнотой информации, приходится разрабатывать специальные методы отыскания экстремума таких функций. Важно понимать, что невозможность в определенных случаях при помощи предложенного в статье алгоритма нахождения экстремума неполностью определенной функции не связана с качеством самого алгоритма, а является следствием объективной реальности, а именно – отсутствия экстремума из-за недостатка информации об анализируемой функции. В тех случаях, когда информация о функции достаточна и потому ее экстремум существует, предложенный алгоритм позволяет его найти (п. 5). Требовать от алгоритма большего, очевидно, нельзя.

Охарактеризуем теперь другие существующие подходы к оптимизации неполностью определенных функций. Кратко об их основных достоинствах и недостатках сказано во введении. Изучим вопрос подробнее. Начнем с детерминированного подхода. Здесь задача оптимизации неполностью определенной функции (исходная) заменяется другой задачей – оптимизации полностью определенной функции. Причем конструирование этой новой задачи путем выбора определенных значений параметров внутри областей неопределенности параметров функции исходной задачи зачастую производится на основе чисто эвристических соображений и не опирается ни на какие математически ясные обобщения понятия экстремума на случай неполностью определенных функций. Из-за этого новая задача оказывается, как правило, математически неэквивалентной исходной, а интерпретация ее

решения в терминах исходной задачи – проблематичной. Кроме того, из-за большой сложности некоторых критериев оптимизации, используемых в новой задаче $(\max\min, \min\max)$, трудоемкость алгоритмов поиска экстремума неполностью определенных функций при детерминированном подходе может оказаться высокой. Зато при этом подходе обычно не возникает проблемы выяснения условий существования экстремума функций, т.к. полностью определенные функции практически всегда имеют экстремум. Теперь о вероятностном подходе. При первом варианте данного подхода исходная задача оптимизации неполностью определенной функции заменяется, как и в случае детерминированного подхода, другой задачей, а именно, оптимизации полностью определенной функции, которая теперь получается из исходной функции путем замены ее случайных параметров их математическими ожиданиями (центрами). Сразу ясно, что эта новая задача неэквивалентна исходной в еще большей степени, чем при детерминированном подходе, поскольку она, не опираясь ни на какие обобщения понятия экстремума для неполностью определенных функций, не учитывает не только неопределенность возможных значений параметров анализируемой функции, но также и случайный характер реализации конкретных значений параметров на практике. При втором варианте подхода задача оптимизации неполностью определенной функции с интервальными параметрами фактически заменяется задачей оптимизации неполностью определенной функции со случайными параметрами. Последние получаются из интервальных параметров исходной задачи принятием, например, гипотезы о равномерном распределении значений параметров внутри своих интервалов. Принятие указанной гипотезы сразу упрощает выбор экстремального интервала. Например, для выбора большего из двух интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ достаточно лишь вычислить вероятности $P(\tilde{a} > \tilde{b})$ и $P(\tilde{b} > \tilde{a})$ и взять тот из интервалов, для которого вероятность превышения им второго интервала больше. Данный подход гарантирует существование решения, полученного с помощью гипотезы модельной задачи оптимизации функции со случайными параметрами. Но проблема заключается в том, что модельная задача неэквивалентна исходной задаче оптимизации функции с интервальными параметрами, так как одно лишь задание неопределенности функции в форме интервалов возможных значений ее параметров не предполагает задания дополнительной информации, например, о вероятностных распределениях внутри интервалов. Все, что говорилось о вероятностном подходе, справедливо и для нечеткого, с заменой термина «вероятностное распределение параметров недетерминированной функции» термином «нечеткое распределение» этих параметров.

В практике для решения конкретных задач оптимизации неполностью определенных функций, в зависимости от условий, могут применяться различные подходы. В общем случае рекомендуется начинать с детерминизационного подхода, поскольку он базируется на точном определении понятия максимума и минимума неопределенной величины (интервала), что упрощает интерпретацию полученного решения и делает его более прозрачным. Если

детерминизационный подход не приводит к решению, вследствие недостаточной информации об оптимизируемой функции, целесообразно эту информацию пополнить путем сужения интервалов возможных значений параметров этой функции с помощью дополнительных измерений, наблюдений, привлечения более квалифицированных экспертов, после чего снова применить данный подход. Если и это не помогло получить решение, рекомендуется использовать другие подходы. В первую очередь, целесообразно попытаться применить вероятностный подход, который достаточно прост в реализации. При этом нужно иметь в виду, что используемые при этом подходе вероятностные распределения параметров неполностью определенной функции должны быть известны с достаточной точностью, т.к. в противном случае найденное предположительно оптимальное значение функции может оказаться далеким от настоящего оптимума. Надо еще учитывать, что при вероятностном подходе получение оптимума функции вообще строго не гарантируется, а только «обещается» с определенной вероятностью, притом не обязательно близкой к единице, что не всегда приемлемо. Поэтому на практике часто обращаются к детерминированному подходу в оптимизации неполностью определенных функций. Этот подход, в отличие от детерминизационного, всегда обеспечивает существование оптимума для неполностью определенной функции, и, в отличие от вероятностного, гарантирует получение этого оптимума. К сожалению, при этом подходе, как говорилось ранее, вследствие преобразования исходной неполностью определенной функции в полностью определенную, новая задача оптимизации оказывается неэквивалентна исходной, а интерпретация ее решения в терминах исходной задачи проблематичной. Например, выбор с помощью детерминированного подхода минимального из двух интервалов $\tilde{a}=[4,5], \tilde{b}=[3,15]$ по критерию оптимальности «нижняя граница интервала минимальна» дает следующее решение: $\min(\tilde{a},\tilde{b})=\tilde{b}=[3,15]$. Но данное решение проблематично интерпретировать практически, поскольку оно противоречит эвристическим представлениям. Любой автомобилист уверенно выберет как более экономную машину с расходом топлива от 4 до 5 л на 100 км машине с расходом 3–15 л!

Заключение

В статье показано, что проблема оптимизации неполностью определенных функций достаточно просто разрешима, если неопределенность задавать в интервальной форме и, кроме того, использовать конструктивную теорию сравнения интервальных величин, которая сводит указанное сравнение к сравнению одноименных границ этих интервалов. Тем самым поиск оптимума неполностью определенной функции можно свести к нахождению одноименного оптимума двух полностью определенных (детерминированных) функций. Наш подход (его естественно назвать детерминизационным) примечателен тем, что позволяет вполне строго свести оптимизацию неполностью определенных функций к хорошо известным и эффективным методам оптимизации полностью определенных функций.

Литература

1. Юдин Д. Б., Гольдштейн Е. Г. Задачи и методы линейного программирования. М. Советское радио, 1964. 735 с.

2. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. М.: Советское радио, 1964. 390 с.

3. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума. М.: Наука, 1967. 268 с.

4. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 280 с.

5. Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 352 с.

6. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. М.: Наука, 1987. 304 с.

7. Левин В. И. Моделирование задач оптимизации в условиях интервальной неопределенности // Известия Пензенского гос. пед. ун-та. Физико-математические и технические науки. 2011. № 26. С. 589–595.

8. Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации // Автоматика и вычислительная техника. 2012. № 4. С. 157–163.

9. Левин В. И. Методы оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности параметров // Информационные технологии. 2012. № 4. С. 52–59.

10. Левин В. И. Оптимальное проектирование в условиях неопределенности. Метод детерминизации // Онтология проектирования. 2013. № 3 (9). С. 41–52.

11. Левин В. И. Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации // Информационные технологии. 2014. № 5. С. 14–21.

12. Левин В. И. Оптимизация в условиях неопределенности методом детерминации // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 3. С. 844–851.

13. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством. М.: Наука, 1975. 616 с.

14. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function // Control and Cybernetics. 1980. Vol. 9. № 4. P. 189–202.

15. Тимохин С. Г., Шапкин А. В. О задачах линейного программирования в условиях неточных данных // Экономика и математические методы. 1981. № 5. С. 955.

16. Рощин В. А., Семенова Н. В., Сергиенко И. В. Вопросы решения и исследования одного класса задач неточного целочисленного программирования // Кибернетика. 1989. № 2. С. 42–46.

17. Семенова Н. В. Решение одной задачи обобщенного целочисленного программирования // Кибернетика. 1984. № 5. С. 25–31.

18. Вощинин А. П., Сотиров Г. Р. Оптимизация в условиях неопределенности. М.: Изд-во МЭИ, 1989. 224 с.

19. Ащепков Л. Т., Давыдов Д. В. Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления. М.: Наука, 2006. 285 с.

20. Давыдов Д. В. Интервальные методы и модели принятия решений в экономике. Диссерт. докт. экон. наук. Дальневосточный гос. ун-т. Владивосток, 2009.

21. Островский Г. М., Волин Ю. М. Технические системы в условиях неопределенности. Анализ гибкости и оптимизация. М. Бином. 2008. 325 с.

22. Островский Г. М., Зиятдинов Н. Н., Лаптева Т. В. Оптимизация технических систем. М.: Кнорус. 2012. 252 с.

23. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях интервальной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1992. № 7. С. 97–106.

24. Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 7. С. 111–122.

25. Левин В. И. Интервальное дискретное программирование // Кибернетика и системный анализ. 1994. № 6. С. 92–103.

26. Левин В. И. Оптимизация расписаний в системах с неопределенными временами обработки. I // Автоматика и телемеханика. 1995. № 2. С. 99–110.

27. Левин В. И. Оптимизация расписаний в системах с неопределенными временами обработки. II // Автоматика и телемеханика. 1995. № 3. С. 106–116.

28. Левин В. И. Задача трех станков с неопределенными временами обработки // Автоматика и телемеханика. 1996. № 1. С. 109–120.

29. Левин В. И. Интервальная модель общей задачи линейного программирования. I // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 1998. Т. 3. № 4. С. 401–407.

30. Левин В. И. Интервальная модель общей задачи линейного программирования. II // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 1999. Т. 4. № 1. С. 18–27.

31. Левин В. И. Нелинейная оптимизация в условиях интервальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. 1999. № 2.

32. Левин В. И. Антагонистические игры с интервальными параметрами // Кибернетика и системный анализ. 1999. № 4. С. 149–159.

33. Левин В. И. О недетерминистской дискретной оптимизации // Принятие решений в условиях неопределенности. Сборник статей. Уфа: Изд-во Уфимского авиационного ин-та, 1990. С. 37–45.

34. Левин В. И. Математическая теория сравнения интервальных величин и ее применение в задачах измерения // Измерительная техника. 1998. № 5. С. 52–63.

35. Левин В. И. Математическая теория сравнения интервальных величин и ее применение в задачах измерения, контроля и управления // Измерительная техника. 1998. № 9. С. 67–79.

36. Левин В. И. Интервальная математика и исследование систем в условиях неопределенности. – Пенза: Изд-во Пензенского технологического ин-та, 1998. 82 с.

References

1. Iudin D. B, Gol'dshtein E. G. *Zadachi i metody lineinogo programmirovaniia* [Tasks and Methods of Linear Programming]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964, 735 p (in Russia).

2. Venttsel' E. S. *Vvedenie v issledovanie operatsii* [Introduction to operational research]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964, 390 p (in Russia).

3. Wilde D.J. Optimum Seeking Methods. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1964, 202 p.

4. Korbut A. A., Finkel'shtein Iu. Iu. *Diskretnoe programmirovanie* [Discrete Programming]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 280 p (in Russia).

5. Moiseev N. N., Ivanilov Iu. P., Stoliarova E. M. *Metody optimizatsii* [Optimization Technique]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 352 p (in Russia).

6. Levin V. I. *Strukturno-logicheskie metody issledovaniia slozhnykh sistem s primeneniem EVM* [Structural-Logical Research Methods of Complex Systems Using Computer]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 304 p (in Russia).

7. Levin V. I. Modeling of Optimization Problems in Condition of Indeterminacy. *Izvestiia Penzenskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta im. V.g. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 589-595 (in Russia).

8. Levin V. I. Optimization in Terms of Interval Uncertainty: The Determinization Method. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, vol. 46. no. 4, pp. 157–163 (in Russia).

9. Levin V. I. Systems Optimization Methods in Conditions of Interval Uncertainty of Parameters. *Information Technologies*, 2012, no. 4, pp. 52-59 (in Russia).

10. Levin V. I. Optimal Design in Condition of Uncertainty Determination Method. *Ontology of Designing*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 41-52 (in Russia).

11. Levin V. I. The Methodology of Optimization in Condition of Uncertainty by Determination Method. *Information Technologies*, 2013, no. 5, pp. 13-21 (in Russia).

12. Levin V. I. Optimization in Conditions of Interval Uncertainty by Determination Method. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University. Natural and Technical Sciences], 2014, vol. 19, no. 3, pp. 844-851 (in Russian).

13. Pervozvanskii A. A. *Matematicheskie modeli v upravlenii proizvodstvom* [Mathematical Models in Production Management]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 616 p (in Russia).

14. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function/ *Control and Cybernetics*, 1980, vol. 9, no 4, pp. 189–202.

15. Timokhin S.G., Shapkin A. V. O zadachakh lineinogo programmirovaniia v usloviiakh netochnykh dannykh [About Linear Programming Problems in Terms of Imperfect Data]. *Economics and mathematical methods*, 1981, no. 5, 955 p (in Russia).

16. Roshchin V.A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Solution and Investigation of One Class of Inexact Integer Programming Problems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 185–193.

17. Semenova N. V. Solution of a Generalized Integer-Valued Programming Problem. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1984, vol. 20, no. 5, pp. 641–651.

18. Voshchinin A. P., Sotirov G. R. *Optimizatsiia v usloviiakh neopredelennosti* [Optimization under uncertainty]. Moscow, MEI Publ., 1989, 224 p (in Russia).

19. Ashchepkov L. T., Davydov D. V. *Universal'nye resheniia interval'nykh zadach optimizatsii i upravleniia* [Universal Solutions of Interval Problems of Optimization and Control]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 285 p (in Russia).

20. Davydov D. V. *Interval'nye metody i modeli priniatiia reshenii v ekonomike*. Diss. dokt. ekon. nauk[Interval Methods and Models of Decision Making in the Economy. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Vladivostok, Far Eastern National University Publ., 2009 (in Russian).

21. Ostrovskii G. M., Volin Iu. M. *Tekhnicheskie sistemy v usloviiakh neopredelennosti. Analiz gibkosti i optimizatsiia* [Technical Systems in Conditions of Uncertainty. Analysis of Flexibility and Optimization]. Moscow, Binom Publ., 2008, 325 p (in Russian).

22. Ostrovskii G. M., Ziiatdinov N. N., Lapteva T. V. *Optimizatsiia tekhnicheskikh system* [Optimization of Technical Systems]. Moscow, Knorus Publ., 2012, 252 p (in Russian).

23. Levin V. I. Discrete Optimization under Interval Uncertainty. *Automation and Remote Control*, 1992, vol. 53, no 7, pp 1039–1047.

24. Levin V. I. Boolean Linear Programming with Interval Coefficients. *Automation and Remote Control*, 1994, vol. 55, no. 7, pp. 1019–1028(in Russian).

25. Levin V. I. Interval Discrete Programming. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1994, vol. 30, no. 6, pp. 866–874.

26. Levin V. I. Scheduling Optimization in Systems with Indefinite Process-ing Times. Part I. *Automation and Remote Control*, 1995, vol 56, no 2, pp. 236–244.

27. Levin V. I. Scheduling Optimization in Systems with Indefinite Processing Times. Part II. *Automation and Remote Control*, 1995, vol. 56,no 3,pp. 394–400.

28. Levin V. I. The 3-Bench Problem with Indefinite Operation Times. *Automation and Remote Control*, 1996, vol. 57, no 1,pp. 89–97.

29. Levin V. I. The Interval Model for the General Problem of Linear Programming. Part I. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University. Natural and Technical Sciences], 1998, vol. 3, no. 4, pp. 401-407 (in Russian).

30. Levin V. I. The Interval Model for the General Problem of Linear Programming. Part II. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie*

nauki [Tambov University. Natural and Technical Sciences], 1999, vol. 4, no. 1, pp. 18-27 (in Russian).

31. Levin V. I. Nonlinear Optimization under Interval Uncertainty. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1999, vol. 35, no. 2, pp. 297–306.

32. Levin V. I. Antagonistic games with interval parameters. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 644-652.

33. Levin V. I. O nedeterministskoi diskretnoi optimizatsii [About a nondeterministic discrete optimization]. *Priniatie reshenii v usloviiakh neopredelennosti. Sbornik statei* [Decision Making under Uncertainty. Digest of articles]. Ufa, Ufa State Aviation Technical University Publ., 1990, pp. 37-45 (in Russian).

34. Levin V. I. Mathematical Theory of Interval Comparison and its Application to Measurement Problems. *Measurement Techniques*, 1998, no. 5, pp. 399-406.

35. Levin V. I. The problem of choosing the points for measurement monitoring of measuring instruments. *Measurement Techniques*, 1998, no. 9, pp. 876-881.

36. Levin V. I. *Interval'naia matematika i issledovanie sistem v usloviiakh neopredelennosti* [Interval Mathematics and the Study of Systems Under Uncertainty]. Penza, Penza State University Publ., 1998, 82 p. (in Russian).

Статья поступила 14 ноября 2015 г.

Информация об авторе

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(8412)670-263. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

Interval Approach to Optimization with Uncertainty

V.I. Levin

Relevance. *The existing approaches to the actual problem of optimization of systems under uncertainty are considered. An exact formulation of problem of constrained optimization under interval uncertainty of the parameters of the objective function and constraints is given. In this connection the mathematical theory of comparison of intervals is set out, including a precise definition of the maximal and minimal intervals, conditions for existence of such intervals and algorithms for finding them.* ***The purpose.*** *The aim of the article is to propose the idea of solving constrained optimization problems under interval uncertainty of its parameters. This idea is based on the rules of the mathematical theory of comparison of intervals which allows replace comparison of intervals and determination of maximal and minimal interval by comparing their lower and upper bounds.* ***Method.*** *On the basis of the proposed idea the determination*

method that allows to solve the problem of constrained optimization under interval uncertainty parameters by reducing it to two entirely certain optimization problems of same type is formulated and proved. ***Novelty.*** *We formulate and prove a theorem that defines the solution of problem of constrained optimization under interval uncertainty of parameters through solutions of two completely certain optimization problems. Also the theorem that defines the necessary and sufficient condition for the existence of a solution of constraint optimization under interval uncertainty is formulated and proved.* ***Result****. The 4-step algorithm for solving constrained optimization under interval uncertainty parameters that implements a method of determination is constructed. The example of algorithm is given. The interval assignment task is selected as a problem to be solved. A comparison of the proposed approach to solving constrained optimization problems with incompletely defined parameters with other methods for solving such problems (deterministic, probabilistic and fuzzy) is done. Advantages and disadvantages of different methods are listed. It is emphasized that the proposed in the article approach allows us to reduce the optimization of incompletely specified functions to fully optimize certain functions strictly mathematically rather than heuristically, as is done in other well-known approaches.*

Keywords: *optimization, uncertainty, interval uncertainty, determination method.*

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Dr. habil. 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. Tel. +7(8412)670-263. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova/Gagarin st., 1A/11.

УДК 658.51

Определение Парето-оптимального множества реализации работы на примере применения генетического алгоритма

Догадина Е. П., Кропотов Ю. А.

Постановка задачи: *одной из целей предприятия является повышение эффективности функционирования производственных систем за счет увеличения загрузки оборудования и персонала и снижения производственных издержек. В связи с появлением новых информационных технологий и сложной структурой организации производства возникает необходимость разработки алгоритмов, позволяющих проводить оптимизации производственных и технологических процессов. В работе рассмотрено определение Парето-оптимального множества среднего времени изготовления изделия с учетом нескольких критериев оптимальности. Разработан и предложен алгоритм векторного управления параметрами производственных процессов. Внесены изменения в ход реализации алгоритма управления в зависимости от поведения целевой функции.* ***Используемые методы:*** *в исследованиях применялись методы многокритериальной оптимизации, стохастические методы глобального поиска, методы аппарата теории массового обслуживания.* ***Результат:*** *в работе представлен поиск оптимальных решений функционирования производственного процесса с учетом применения модифицированного генетического алгоритма при различном числе популяций и поколений. С помощью разработанного алгоритма экономится время на оптимизацию графика производства с учетом требуемых производственных ограничений, а также осуществляется возможность оперативно реагировать на смену приоритетов и непредвиденные обстоятельства в ходе выполнения производственного процесса.*

Ключевые слова: *критерий, оптимизация, аддитивная свертка, стохастический метод, Парето-оптимальное множество.*

Введение

В работе разработан и реализован алгоритм управления на базе стохастических методов глобального поиска, который предлагается применять при поиске глобальных решений производственных задач с высокой размерностью системы или при неизвестном поведении целевой функции.

В качестве метода глобального поиска для составления алгоритма векторного управления производственными процессами для мелкосерийного типа производства выбран метод на базе генетического алгоритма. Генетические алгоритмы представляют собой адаптивные методы поиска, которые в последнее время часто используются для решения задач функциональной оптимизации.

Модифицированный метод генетического алгоритма

Методика кодирования оптимизируемых параметров состоит в их преобразовании в двоичные целочисленные строки достаточной длины - достаточной для того, чтобы обеспечить желаемую точность. В работе введен термин хромосома, в качестве которой представляется каждое значение вектора оптимизируемых параметров $X = (X_1, X_2, ..., X_n) \in \Omega_{доп}$. Хромосомы эволюционируют на протяжении множества итераций, носящих название поколений (или генераций). В ходе каждой итерации хромосома оценивается с использованием некоторой меры, которую называют функцией соответствия.

Функция соответствия играет роль среды и оценивает хромосомы по степени их приспособленности к выполнению критерия оптимизации.

Хромосомы с большей функцией соответствия имеют больше шансов быть выбранными (выжить).

Наибольшее распространение на практике получил подход, называемый колесо рулетки [1, 2]. Согласно этому подходу отбор осуществляется на основе некоторой функции распределения, которая строится пропорционально вычисленным функциям соответствия сгенерированных вариантов-хромосом. Колесо рулетки может быть сконструировано следующим образом:

1) вычисляем значение функции соответствия $F_k(X_k)$ для каждой хромосомы $X_k, k = 1..N_{pop}$, N_{pop} – размер популяции;

2) вычисляем общую функцию соответствия популяции:

$$f = \sum_{k=1}^{N_{pop}} (F_k(X_k) - \min_{j=1..N_{pop}} (F_j(X_j)));$$

3) вычисляем вероятность отбора p_k для каждой хромосомы X_k

$$p_k = \frac{F_k(X_k) - \min_{j=1..N_{pop}} (F_j(X_j))}{f}, k = 1..N_{pop};$$

4) вычисляем совокупную вероятность q_k для каждой хромосомы X_k

$$q_k = \sum_{j=1}^{k} p_j, k = 1..N_{pop}.$$

Процесс отбора начинается с процедуры выбора значения вектора оптимизируемого параметра N_{pop} раз. При этом каждый раз выбирается одна хромосома по следующему алгоритму: генерируем случайное число r_k, и если это число меньше совокупной вероятности q_k хромосомы X_k, то выбираем k-ую хромосому для новой популяции.

В работе используется одноточечный кроссинговер [1, 2]. К полученному в результате отбора и скрещивания новому поколению применяется оператор мутации, необходимый для «выбивания» популяции из локального экстремума и способствующий защите от преждевременной сходимости. Определенный бит выбранной особи популяции с некоторой малой вероятностью (обычно меньше $P_{myt} \le 1\%$) инвертируется.

Сформулируем алгоритм управления процессами производства на базе генетического алгоритма [3–5], состоящий из следующих шагов:

1. Генерация начальной популяции.

Заполнение популяции особями, в которых элементы массива (биты) заполнены случайным образом в пределах границ, определенных пользователем.

2. Определение параметров генетического алгоритма.

Параметрами алгоритма являются размер популяции особей N_{pop}, число поколений N_{pok}, вероятность кроссинговера $P_{skresch}$ и вероятность мутации

P_{myt}, определяющие для каждой популяции число пар скрещивающихся хромосом и число мутирующих хромосом.

3. Генерация исходной популяции.

Исходная популяция может быть сформирована случайным образом.

4. Выбор родительской пары.

Выбор родительской пары осуществляется с помощью метода рулетки, то есть метода пропорционального отбора. Хромосомы отображаются в виде отрезка линий или секторов рулетки таким образом, что их размер пропорционален значению целевой функции. Далее случайным образом генерируем числа в интервале от 0 до 1, и в качестве родителей выбираются те особи, в чей отрезок попадают случайные числа. При этом номера хромосом родителей должны отличаться.

5. Скрещивание хромосом особей.

Кроссинговер происходит следующим образом: берем случайную точку $r \in \{0,1\}$ и выбираем хромосомы для скрещивания. После этого используется кроссинговер с одной точкой обмена, изложенный выше.

6. Мутация хромосом особей.

Определяется число мутаций и выбор хромосомы для мутации. Осуществляется одноточечная мутация.

7. Проверка условия завершения процесса эволюции.

Если условие завершения алгоритма не выполнено, то переход на шаг 4, иначе переход на шаг 8. В качестве условия завершения процесса может быть достижение заданного числа поколений или получение определенного числа одинаковых особей.

8. Формирование Парето-оптимального решения.

Для решения конкретной задачи управления в соответствии с ее особенностями по приведенной выше схеме разрабатывается генетический алгоритм с задаваемыми ЛПР параметрами алгоритма.

В данной работе предлагается модификация генетического алгоритма, имеющая следующие особенности [3, 5, 6].

1) В качестве хромосом представляются значения вектора оптимизируемых параметров $X = (X_1, X_2, ..., X_n) \in \Omega_{доп}$. Причем каждая особь популяции должна принадлежать области допустимых значений $\Omega_{доп}$. Под особью $X_{i,}, i = 1..N_{pop}$ понимается соответствующее значение вектора $X = (X_{i,1}, X_{i,2}, ..., X_{i,n}) \in \Omega_{доп}$, в котором число изменений особей и ген зависит от числа поколений N_{pok}.
2) Функция соответствия хромосомы определяется для каждой особи в отдельности и представляет собой значение целевой функции, вычисленного с помощью векторной свертки, в зависимости от критериев.
3) Выбранные гены (компоненты особи $\left(X_{i,1}, X_{i,2}, ..., X_{i,n}\right)$) для скрещивания не должны совпадать, а также значение этих ген должно быть в пределах области допустимых значений, иначе выбор других ген.

4) Для осуществления мутации необходимо выбрать ген, который подвергается мутации, и обозначить его порядковый номер в популяции; бит в гене, который надо мутировать.
5) В качестве условия завершения процесса используем достижение заданного числа поколений.

Программное представление полученных результатов

Представим решение производственного процесса с последовательной ячеистой структурой, характерной для мелкосерийного типа производства, с применением разработанного метода многокритериального управления на базе генетического алгоритма.

В первом варианте рассмотрим размер популяции N_{pop} больший, чем число поколений N_{pok}; а во втором варианте число поколений N_{pok} больше, чем размер популяции особей N_{pop}. Примем значения вероятности кроссинговера $P_{skresch} = 0{,}1$ и вероятности мутации $P_{myt} = 0{,}01$.

Результаты решения задачи для данного варианта и множество Парето изображено на рис. 1. В качестве оптимизируемого параметра выбрано среднее время изготовления изделия $\bar{t}_{изгот} = \dfrac{1}{\mu}$. Рассмотрим реализацию метода для варианта 1: $N_{pop} = 50$; $N_{pok} = 20$.

Весовой коэф-фициент важности ξ	Среднее относитель-ное время занятости персонала K_1	Средняя относитель-ная стоимость изготовления изделия K_2	Интенсив-ность изготовле-ния изделия μ, мин$^{-1}$	Среднее время изготовле-ния изделия $\bar{t}_{изгот}$, мин
0,0	0,012137	0,01012	0,98817	1,012
0,1	0,012163	0,01014	0,98602	1,0142
0,2	0,012845	0,01071	0,93358	1,0711
0,3	0,015053	0,01255	0,79635	1,2557
0,4	0,015935	0,01329	0,75214	1,3295
0,5	0,18074	0,15668	0,06382	15,668
0,6	0,42846	0,426735	0,0234	42,735
0,7	0,56278	0,68147	0,01467	68,147
0,8	0,62184	0,8702	0,01149	87,025
0,9	0,65062	1	0,01	100
1,0	0,65062	1	0,01	100

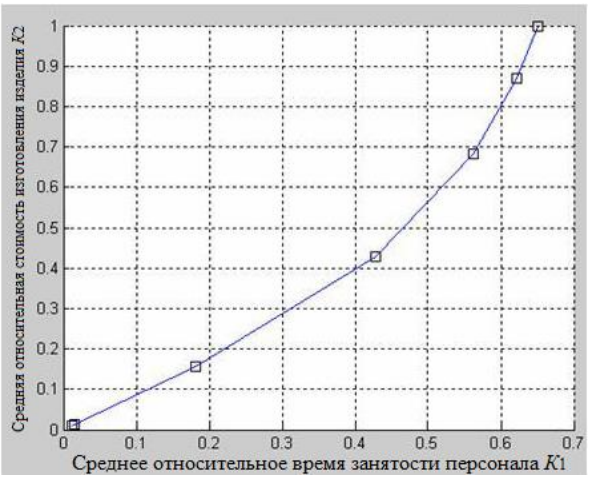


Рис. 1. Результаты управления и Парето-оптимальное множество реализации работы на базе генетического алгоритма при $N_{pop} = 50$; $N_{pok} = 20$

В качестве критериев оптимальности представлены следующие характеристики [5, 6]:

Среднее относительное время занятости персонала на протяжении процесса изготовления изделия

$$K_1 = \frac{1}{M \cdot T} \int_0^T \bar{z}(t)dt \to \max,$$

где $\bar{z}(t)$ – среднее число параллельно занятого персонала, определяемое как

$$\bar{z}(t) = \sum_{i=2}^{M+1}(i-1)p_i(t) + M\sum_{j=1}^{Q} p_{M+j+1}(t),$$

где p_i – вероятность пребывания системы в состоянии, в котором i деталей требуют обслуживания и i персонала 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 – количество персонала, выполняющего этапы параллельно; Q – длина очереди.

Средняя относительная стоимость изготовления одного изделия

$$K_2 = \frac{c_{зп}\bar{t}_{изгот}}{c_{макс}} \to \min,$$

где $c_{зп}$ – заработная плата персонала по обслуживанию за одно изготовленное изделие; $c_{макс}$ – максимально возможные трудозатраты предприятия на изготовление одного изделия; $\bar{t}_{изгот}$ – среднее время изготовления изделия персоналом.

В результате реализации программного модуля поиска оптимальных решений функционирования производственного процесса определено, что оптимальное среднее время изготовления изделия составляет 87,025 мин. По полученным данным время занятости обслуживающего персонала в процессе изготовления одного изделия равно 4,974 часа в день, а расходы на изготовление этого изделия составляют 72,226 руб [3, 5].

Рассмотрим реализацию метода для варианта 2: $N_{pop} = 20$; $N_{pok} = 50$.

Результаты решения задачи для данного варианта и множество Парето изображено на рис. 2.

Весовой коэф-фициент важности ξ	Среднее относитель-ное время занятости персонала K_1	Средняя относитель-ная стоимость изготовления изделия K_2	Интенсив-ность изготовле-ния изделия μ, мин$^{-1}$	Среднее время изготовле-ния изделия $\bar{t}_{изгот}$, мин
0,0	0,012017	0,01002	0,99801	1,002
0,1	0,012019	0,010021	0,99786	1,0021
0,2	0,012152	0,010132	0,98694	1,0132
0,3	0,012153	0,010133	0,98687	1,0133
0,4	0,012177	60,01015	0,98494	1,0153
0,5	0,2682	0,24001	0,04166	24,001
0,6	0,4443	0,45057	0,02119	45,057
0,7	0,5463	0,64074	0,0156	64,074
0,8	0,6238	0,87846	0,011384	87,846
0,9	0,65059	0,99986	0,010001	99,986
1,0	0,65062	1	0,01	100

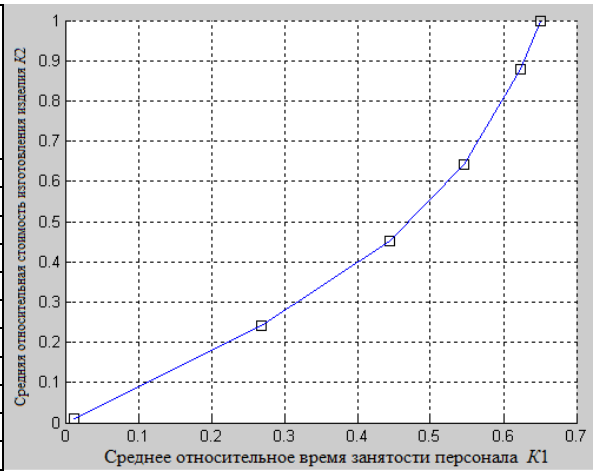


Рис. 2. Результаты управления и Парето-оптимальное множество реализации работы на базе генетического алгоритма при $N_{pop} = 20$; $N_{pok} = 50$

При реализации второго варианта работы с применением метода оптимизации на базе генетического алгоритма при $N_{pop} = 20$; $N_{pok} = 50$ определено, что оптимальное среднее время изготовления изделия составляет

87,846 мин; время занятости обслуживающего персонала в процессе изготовления одного изделия равно 4,9904 часа в день; расходы на изготовление этого изделия составляют 72,912 руб.

На базе полученных результатов при различном значении числа поколений и популяций определено, что оба варианта решения являются максимально приближенными к реальному значению оптимального среднего времени функционирования производственного процесса.

Выводы

Таким образом, применение разработанного алгоритма оптимизации позволяет осуществить многокритериальное управление процессами производства с высокой точностью и минимальными временными затратами.

Данная работа интересна и необходима в связи с тем, что с помощью предложенной разработки можно осуществлять многокритериальную оптимизацию процессов с последовательной ячеистой структурой, характерной для предприятий с мелкосерийным типом производства.

Литература

1. Рутковская Д. И. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

2. Коренюшкин А. А. Генетические алгоритмы // Программист. 2003. №2. С. 74-80.

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

4. Догадина Е. П. Функциональная модель управления производственными процессами с последовательной ячеистой структурой // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 1. С. 119-120.

5. Догадина Е. П., Коноплев А. Н. Многокритериальное управление процессами мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 1. С. 121-123.

6. Догадина Е. П. Программный комплекс автоматизации управления производственными процессами на базе стохастических методов локального поиска // Радиопромышленность. 2012. № 2. С. 154-159.

References

1. Rytkovskaya D I. Neyronnye network, genetic algorithms and ill-defined systems. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2004. 452 p. (in Russia).

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 Russia).

3. Dogadina E. P. Functional model of management production process with consequent cellular structure. *Methods and devices of information transmission and processing*, 2011, no 1, pp. 119-120. (in Russia)

4. Dogadina E. P., Konoplev A. N. Mnogokriterialinoe management process production equipments. *Methods and devices of information transmission and processing*, 2011, no 1, pp. 121-123. (in Russia)

5. Dogadina E. P. Programme complex to automations of management production process on base of the stochastic methods for local searching. *Radio industry*, 2012, no 2, pp. 154-159. (in Russia)

Статья поступила 14 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)77272. E-mail:delena86@yandex.ru

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой электроники и вычислительной техники. Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых. Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

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

Determination Steamed Ensemble to Realization of the Work on Example of the Using the Genetic Algorithm

E. P. Dogadina, Y. A. Kropotov

Purpose. *One of the integer of the enterprise is increasing to efficiency of the operating the production systems to account of the increase the loading the equipment and personnel and reductions of the production costs. In connection with appearance new information technology and complex structure to organizations production appears need of the development algorithm, allowing conduct the optimization production and technological processes. Determination Steamed-optimum ensemble of the mean time of the fabrication of the product is considered In work with provision for several criterions. It Is Designed and offered algorithm of vector management parameter production processes. Contributory changes to move of the realization of the algorithm of management depending on behaviours of the target function.* ***Methods.*** *In research used methods to optimization, stochastic methods of global searching for, methods of the device*

queueing theory. ***Results.*** *In work is presented searching for of the optimum decisions of the operating the production process with provision for using modified genetic algorithm under different count;calculate;list population and generations. By means of designed algorithm is spared time for optimization graphics production with provision for required production restrictions, as well as is realized possibility operative to respond to change priority and incidental circumstance in the course of performing the production process.*

Key words*: criterion, optimization, folding, stochastic method, Steamed-optimum ensemble.*

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

Yurij Anatolievich Kropotov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Head of 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 621.391

Исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена

Кропотов Ю. А., Белов А. А.

Постановка задачи: *исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена актуально. Разработан метод определения вероятности превышения оцифрованных отсчетов речевых сигналов порогового уровня квантования. Для решения данной задачи применено выражение распределения плотности вероятности отсчетов амплитуд речевых сигналов с пониженной погрешностью. Исследован вопрос вычисления дисперсии речевых сигналов с нефиксированным максимальным уровнем отсчетов. При этом применено известное значение дисперсии нормированных отсчетов речевых сигналов в цифровой форме. Исследовано влияние шумов квантования на отношение сигнал/шумы квантования при оцифровке речевых сигналов.* ***Используемые методы:*** *методы статистической радиотехники, теории вероятностей, теории радиотехнических цепей и сигналов, методы локальной аппроксимации.* ***Результаты:*** *в работе представлен метод вычисления вероятности превышения порогового уровня отсчетами оцифрованных речевых сигналов. Разработано выражение вычисления дисперсии при ненормированных значениях максимальных отсчетов речевых сигналов. Представлена зависимость отношения сигнал/шумы квантования от числа разрядов в кодовых последовательностях отсчетов речевых сигналов.* ***Практическая значимость:*** *получены выражения для вычисления статистических характеристик сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена. Вышеуказанные выражения представлены в удобной для инженерной практики форме.*

Ключевые слова: *статистические параметры, оперативно-командные системы, вероятность превышения порога, телекоммуникационные системы, шумы квантования, отношение сигнал/шум.*

Введение

Современные оперативно-командные телекоммуникационные системы проектируются на цифровой элементной базе. Имеющиеся в них входные аналоговые сигналы соответственно оцифровываются, поэтому возникают некоторые особенности вычисления статистических параметров при обработке этих сигналов и при прохождении их в трактах проектируемых систем. Информация об этих параметрах влияет на структуру проектируемой системы, на алгоритмы обработки сигналов.

Вероятность превышения отсчетов речевых сигналов *i*-го интервала квантования порогового уровня

При исследовании зависимости вероятности превышения некоторого уровня *i*-го порогового интервала квантования для оцифрованных речевых сигналов, возможно применение выражения закона распределения плотности вероятностей отсчетов амплитуд речевых сигналов в виде [1, 2]

$$P(x_i) = \sum_{k=1}^{M} A_k e^{-\frac{|x_i|}{B_k}}, \qquad (1)$$

где значения параметров функции аппроксимации закона распределения: M=3, A_1=0,237038956, A_2=0,033715075, A_3=0,003135969, B_1=0,47697697

B_2=7,739749293, B_3=9,647790078 [2, 4], погрешность аппроксимации составляет ε≤5%.

Тогда вероятность превышения порогового уровня определяется по выражению

$$P_{\sum} = \sum_{i_{пор.}}^{2^n-1} P(x_i), \tag{2}$$

где $i_{пор.}$ – номер интервала порогового уровня.

Если ввести нормирование максимальных уровней отсчетов по правилу $|\pm x_{\max}| = 1$, то выражение вычисления интервала квантования принимает вид

$$\Delta = \frac{2 \cdot |\pm x_{\max}|}{2^n} = 2^{-(n-1)}, \tag{3}$$

где n – число разрядов в кодовой последовательности отсчетов.

При принятии значения порога на уровне среднеквадратического отклонения речевых сигналов, то значение номера порогового интервала – i, или значение кода порогового уровня определяется выражением

$$i_{пор.} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\Delta} = \sigma \cdot 2^{n-1}. \tag{4}$$

При значениях n=8, $|\pm x_{\max}| = 1$, $\sigma^2 = 0{,}126$ Вт [6], $i_{пор.}$=46 ($i_{пор.}$=0010110). Тогда вероятность превышения отсчетов речевых сигналов порогового уровня равного σ в соответствии с (2) принимает значение $P_{\sum} \le 0{,}0117$. Таким образом, превышение отсчетов речевых сигналов порогового уровня равного их среднеквадратичному отклонению происходит с вероятностью не более 1,17%.

Математическое ожидание и дисперсия оцифрованных отсчетов дискретизированных речевых сигналов

В работах [3, 4] значения статистических характеристик речевых сигналов получены при ограничениях на стационарность и эргодичность процесса. Представленная в работе [2] аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов амплитуд речевых сигналов $P(x_i)$ позволяет получить статистические параметры без учета вышеуказанных ограничений.

В этом случае математическое ожидание дискретизированного и квантованного на 2^n интервалах сигнала определяется выражением

$$\bar{x}_n = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i P(x_i), \tag{5}$$

тогда вычисленное значение математического ожидания оцифрованного речевого сигнала $\bar{x}_n \approx 0$.

Алгоритм исследования дисперсии оцифрованных речевых сигналов на тех же интервалах квантования, при $\bar{x}_n = 0$, определяется выражением

$$\sigma^2 = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i^2 P(x_i). \tag{6}$$

С учетом нормирования максимальных значений отсчетов речевого сигнала по правилу $|\pm x_{\max}|=1$, вычисленное значение дисперсии и соответственно мощности речевых сигналов на сопротивлении 1 Ом, будет равным $\sigma^2 = P_c = 0{,}126$ Вт [6].

Если $|\pm x_{\max}|$ – не нормировано, то интервал квантования $\Delta_{пр.}$ в соответствии с (4) определяется по выражению

$$\Delta_{пр.} = \frac{2\cdot|\pm x_{\max}|}{2^n} = |\pm x_{\max}|\cdot 2^{-(n-1)}, \tag{7}$$

в этом случае

$$\sigma^2_{пр.} = \left(i_{дисп.}\cdot\Delta_{пр.}\right)^2 = i^2_{дисп.}\cdot\Delta^2_{пр.} = i^2_{дисп.}\frac{2^2|x_{\max}|^2}{2^{2n}} = i^2_{дисп.}2^{-2(n-1)}x^2_{\max}, \tag{8}$$

где $i_{дисп.}$ – номер интервала среднеквадратического отклонения речевых сигналов, в соответствии с (4) определяется выражением $i_{дисп.} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\Delta} = 2^{n-1}\sqrt{\sigma^2}$, σ^2 – значение дисперсии речевого сигнала, $\Delta = 2^{-(n-1)}$ – значение интервала квантования, при нормировке отсчетов речевых сигналов по правилу $|\pm x_{\max}|=1$.

Тогда значения дисперсии речевых сигналов при ненормированном значении максимального уровня отсчетов вида $|\pm x_{\max}|$, в соответствии с (8) определяется выражением

$$\sigma^2_{пр.} = x^2_{\max}\sigma^2. \tag{9}$$

Таким образом, получено удобное для инженерной практики выражение вычисления дисперсии речевых сигналов с произвольным значением максимальных отсчетов, при известном значении σ^2 нормированных речевых сигналов.

Шумы квантования оцифрованных речевых сигналов в системах телекоммуникаций аудиообмена

При выполнении оцифровки речевых сигналов в каждый дискретный момент времени t имеет место ошибка квантования d_i, представляющая собой разность соответствующих значений реального x и квантованного по уровню сигналов:

$$d_i = x - y_i,$$

где y_i – ближайший интервал квантования.

Последовательность $d_i(k)$ – шумы квантования. Изменение значений $d_i(k)$ – случайный процесс с нормальным законом распределения плотности вероятностей, пределы изменений $d_i(k)$ в соответствии с выражением $|d_i(k)| \le \Delta$.

Мощность шума квантования $P_{кв}$ на единичном сопротивлении будет определяться как [6]

$$P_{кв} = \overline{d_i^{\,2}} = \sum_{i=1}^{2^n}\int_{y_i-\Delta/2}^{y_i+\Delta/2}(x-y_i)^2 P(x)dx, \tag{10}$$

где n – количество разрядов в цифровом коде, представляющим уровень отсчета сигнала,
$P(x)$ – распределение плотности вероятности уровней сигнала x,
$|\Delta| = (y_i - y_{i+1})$ - интервал квантования.

Так как сравнение дискретного отсчета сигнала x и i-того интервала квантования осуществляется только в моменты, соответствующие дискретным интервалам времени, шумы квантования представляют собой последовательность дискретных отсчетов [7-9], поэтому выражение вычисления мощности шума квантования на конечном интервале из N отсчетов имеет вид

$$P_{ш.кв} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(x_k - x_{кв.k}(i)\right)^2, \tag{11}$$

где N – количество отсчетов в реализации;
x_k – значение аналогового сигнала, соответствующее k-му отсчету;
$x_{кв\,k}(i)$ – ближайший i-ый уровень квантования, соответствующий k-му отсчету.

Максимальное отклонение ошибки квантования может быть $\left| x_k - x_{кв.k} \right| = \Delta$.

Усредненное значение абсолютной ошибки по N отсчетам [6]

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left|x_k - x_{кв.k}(i)\right| = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}. \tag{12}$$

Тогда выражение вычисления мощности шума квантования можно записать в следующем виде

$$P_{ш.кв.} = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1}\overline{\Delta^2}P(x_i) = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1}\frac{\Delta^2}{12}P(x_i),\ P_{ш.кв.} = \frac{\Delta^2}{12}. \tag{13}$$

Отношение $\frac{P_{c.}}{P_{ш.кв.}}$ в соответствии с (6) и (13) имеет вид

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв.}} = \frac{\sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i^2 P(x_i)}{\sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1}\frac{\Delta^2}{12}P(x_i)} = \frac{12\sigma^2}{\Delta^2}, \tag{14}$$

где $P_c = \sigma^2$, $P_{ш.кв.} = \frac{\Delta^2}{12}$, в соответствии с (6) и (13).

Значение $P_{ш.кв.}$ в зависимости от числа разрядов n в цифровом коде отсчетов в соответствии с (13) имеет вид

$$P_{ш.кв.} = \frac{1}{3}2^{-2n}. \tag{15}$$

Тогда выражение (14) можно привести к виду

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв.}} = 3\cdot 2^{2n}\sigma^2 \text{ или } \frac{P_c}{P_{ш.кв.}}(дБ) = 10\log 3\cdot 2^{2n}\sigma^2. \tag{16}$$

Функция изменения отношения $\frac{P_{c.}}{P_{ш.кв.}}$ в дБ, в зависимости от числа разрядов в цифровом коде отсчета, представлена на рис. 1.

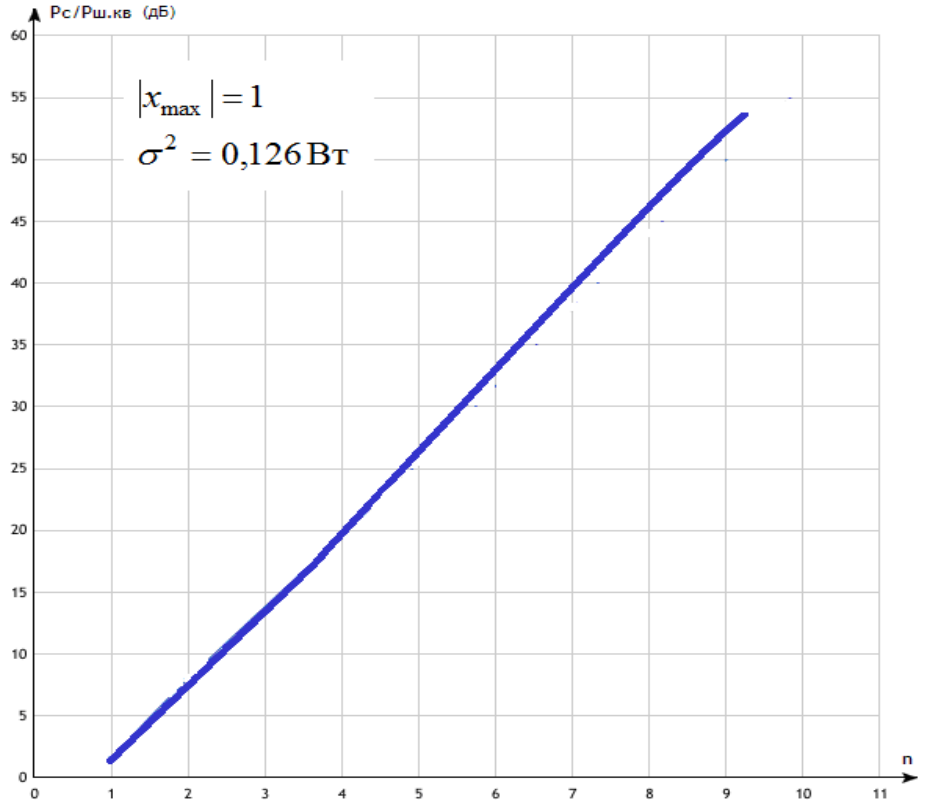


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал/шум квантования от разрядности кодирования отсчетов сигналов

Результаты влияния шумов квантования на отношение $\frac{P_{c.}}{P_{ш.кв.}}$, получены при ограничениях:

– шум квантования является стационарным случайным процессом;
– шум квантования не коррелирован с отсчетами реализации x_i;
– шум квантования не коррелирован в соседних интервалах.

При представлении отсчетов речевых сигналов восьмиразрядной кодовой последовательностью (n=8) получаем отношение $\frac{P_{c.}}{P_{ш.кв.}}$=44 дБ.

Выводы

В результате представленных в работе исследований получены выражения вычисления вероятности превышения значений кодовых отсчетов речевых сигналов i-го интервала квантования порогового уровня, получено выражение значения дисперсии ненормированных отсчетов речевых сигналов. Получены результаты исследований влияния шумов квантования на отношение $\frac{P_{c.}}{P_{ш.кв.}}$ в зависимости от числа разрядов в кодовых последовательностях отсчетов речевых сигналов. Представлен график зависимости $\frac{P_{c.}}{P_{ш.кв.}}$ в децибелах от числа разрядов в кодовых последовательностях отсчетов речевых сигналов. Таким образом, получены в удобной для инженерной практики форме

вышеперечисленные выражения вычисления статистических характеристик сигналов в системах телекоммуникаций аудиообмена.

Литература

1. Кропотов Ю. А., Кульков Я. Ю. Аппроксимация закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 11. С. 63–66.

2. Кропотов Ю.А., Быков А.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы передачи речевой информации // Проектирование и технология электронных средств. 2007. № 2. С. 30–34.

3. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Исследование математического ожидания, дисперсии и функции автокорреляции речевого сигнала // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 2005. – 170 с.

4. Кропотов Ю. А. Экспериментальные исследования закона распределения вероятности амплитуд сигналов системы передачи речевой информации // Проектирование и технология электронных средств. 2006. Т. 4. С. 37-42.

5. Прагер Э., Шимек Б., Дмитриев В. П. Цифровая техника в связи. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.

6. Кропотов Ю. А. Статистические параметры сигналов при проектировании оперативно-командных телекоммуникационных систем // В мире научных открытий. 2010. № 6-1. С. 39–44.

7. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. №1. С. 60–65.

8. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61–63.

9. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 46–50.

References

1 Kropotov Y. A., Kulkov Y. Y. The Approximation a Regularity Distribution Probability Amplitudes of Speech Signals. *Radiotehnika*, 2006, no. 11, pp. 63–66 (in Russia).

2. Kropotov Y. A., Bykov A.A. Model' zakona raspredeleniia veroiatnosti amplitud signalov v bazise eksponentsial'nykh funktsii sistemy peredachi rechevoi informatsii [Model of Law Probability Distribution of the Signal Amplitudes in the Basis of Exponential Functions of the Transmission Voice Information. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2007, no. 2, pp. 30–34 (in Russia).

3. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Issledovanie matematicheskogo ozhidaniia, dispersii i funktsii avtokorreliatsii rechevogo signala [A Study of Mathematical

Expectation, Variance and Autocorrelation Function of the Speech Signal]. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitel'nyh sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr*. Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University Publ., 2005, 170 p. (in Russia).

4. Kropotov Y. A. Experimental Study of the Law of Probability Distribution of the Signal Amplitudes of the Transmission of Voice Information. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2006. Vol. 4, pp. 37–42 (In Russia).

5. Prager I., Simek B., Dmitriev V.P. *Tsifrovaia tekhnika v sviazi* [Digital technology in communication]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 1981, 280 p. (in Russia).

6. Kropotov Y. A. Statistical Parameters of Signals at Designing Operatively-Command Telecommunication Systems. *In the World of Scientific Discoveries*, 2010, no. 6-1, pp. 39–44 (in Russia).

7. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algorithm of suppression of acoustic noise and the concentrated hindrances with formant band distribution rejection *Voprosy radiojelektroniki*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60–65 (In Russia).

8. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approximation of the Distribution Law of Probability of Countings of Signals of Acoustic Noise Interferences. *Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 2, pp. 61–63 (In Russia).

9. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. On the Correlation Estimation of Parameters of Models of Acoustic Echo-Signals. *Voprosy radiojelektroniki, serija OT*, 2010, no. 1, pp. 46–50 (In Russia).

Статья поступила 8 ноября 2015 г.

Информация об авторах

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Белов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

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

Research of the Statistical Characteristics of Digitized Signals in Telecommunications Audio Exchange Systems

Y. A. Kropotov, A. A. Belov

Purpose. *Research of the statistical characteristics of digitized signals of radio telecommunication systems is overdue. A method for determining the probability of exceeding the digitized samples of speech signals threshold quantization. To solve this problem we apply the expression of probability density distribution of the amplitudes of samples of speech signals with reduced accuracy. The question of calculating the dispersion of speech signals the maximum level of non-fixed samples. Thus using known dispersion value normalized samples of speech signals in digital form. The effect of quantization noise on the signal / quantization noise when digitizing speech signals.* ***Methods.*** *Methods of statistical radio engineering, probability theory, theory of radio circuits and signals, the local approximation.* ***Results.*** *This paper presents a method for calculating the probability of exceeding the threshold of digitized samples of speech signals. Developed by the variance in the expression of non-normalized value of the maximum sample speech signals. The dependence of the signal / noise quantization of the number of digits in the code sequence of samples of speech signals.* ***Practical significance.*** *Obtained the expression for the calculation of the statistical characteristics of the signals of telecommunication systems audio exchange. The above expressions are presented in a convenient form for engineering practice.*

Key words: statistical parameters, operational and command systems, the probability of exceeding the threshold, telecommunications systems, quantization noise, signal/noise ratio.

Information about Authors

Yurij Anatolievich Kropotov – Dr. habil. of Technical Sciences, Professor. Head of Chair «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

Alexey Anatolievich Belov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. 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: telecommunications monitoring and forecasting system, information processing. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

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

УДК 681.324

Модель одномерной функции плотности вероятности речевых сигналов

Кропотов Ю. А.

Постановка задачи: *Системы телекоммуникаций функционируют в условиях сложных помех. При проектировании телекоммуникационных систем аудиообмена необходимо владеть априорной информацией о статистических характеристиках сигналов. Также необходимо создание эффективных моделей сигналов и помех с пониженной погрешностью. В статье рассматривается одномерная функция плотности вероятности речевых сигналов. Разработан алгоритм гистограммной оценки одномерной функции плотности вероятности оцифрованных отсчетов речевых сигналов. Автором рассмотрено восстановление плотности вероятности речевых сигналов по эмпирическим данным. Проведена разработка аппроксимации распределения плотности вероятностей речевых сигналов многочленом по системе экспоненциальных функций. Рассматривается итерационный метод вычисления коэффициентов экспонент многочлена аппроксимации.* ***Используемые методы:*** *метод гистограммной оценки функции плотности вероятности, метод восстановления плотности вероятностей по эмпирическим данным, метод оптимизации, метод минимизации взвешенной функции невязки, метод последовательных итераций, методы локальной аппроксимации.* ***Результат:*** *Разработан рекуррентный алгоритм определения параметров многочлена по системе экспоненциальных функций. Данный алгоритм, предназначен для аппроксимации одномерных распределений плотности вероятности речевых сигналов. Его применение обеспечивает погрешность восстановления плотности вероятности менее 5 %.*

Ключевые слова: *модель функции, речевые сигналы, плотность вероятности, гистограммная оценка.*

Введение.
Алгоритм гистограммной оценки функции плотности вероятности оцифрованных отсчетов речевых сигналов

Одной из адекватных характеристик аналогового речевого сигнала является функция плотности вероятностей. Функция плотности вероятности отсчетов $x(i)$ речевого сигнала имеет такой же вид и оценивается путем построения гистограммы по большому числу данных, полученных на заданном интервале времени [1] Предлагаемый алгоритм построения гистограммы по оцифрованным отсчетам n-разрядными двоичными числами на заданном интервале времени представлен выражением [2, 3]

$$P(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=-2^n+1}^{2^n-1} \sum_{i=1}^{N} \delta_{x_i j} \ , \qquad (1)$$

где $P(x_i)$ – оценка вероятности выборки x_i,

x_i – i-я выборка, представленная номером уровня квантования, $x_i \in [-2^n+1, 2^n-1]$, $|x_{i,\max}| = 2^n - 1$,

N – число выборок в анализируемом сигнале,

i – номер выборки в анализируемом интервале (i = 1, 2, … , N),

j – номер интервала гистограммы для анализа числа попаданий в него x_i-тых выборок, $j \in [-2^n+1, 2^n-1]$,

n – разрядность двоичного числа, представляющего выборку x_i и представляющего номер интервала гистограммы,

δ_{ij} – символ Кронекера, имеющий вид $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = j, \\ 0, & \text{если } x_i \neq j. \end{cases}$

Гистограммы речевого сигнала, полученные по данным различного объема *N*, приведены на рис. 1 [4, 5]. Из них, в частности, следует, что при числе выборок менее 1000 ($F_д$=11025 Гц) гистограмма имеет изрезанный характер и необходимо увеличение интервала разбиения $(n_{k-1}, n_k]$, чтобы сгладить ее. При использованной величине интервала приемлемый уровень сглаживания гистограммы достигается при числе выборок более 10000 [4, 6]. Форма гистограмм в силу нестационарного характера речевого сигнала зависит, естественно, и от рассматриваемого фрагмента речи. Для различных фрагментов гистограммы могут значительно отличаться по форме. Гистограммы, приведенные на рис.1, соответствуют интервалам активности абонента. Погрешность гистограммной оценки сигнала можно представить нормой отклонения этой оценки от априорно известной плотности вероятностей. Норму при этом можно задать любым известным способом.

Абсолютная погрешность оценивания плотности вероятностей сигнала вводится формулой [4, 7]

$$\Delta = \frac{1}{2^{n+1}} \sum_{j=-2^n+1}^{2^n-1} \left| P_{x_j}^N - P_{x_j} \right|, \tag{2}$$

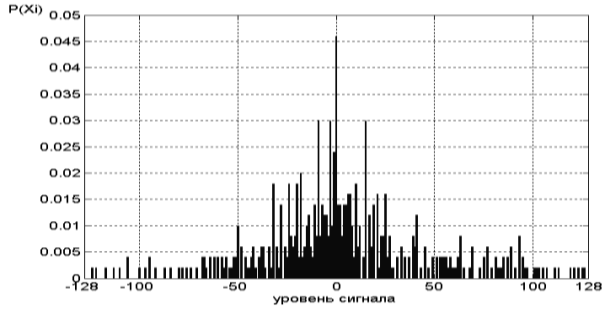
где $P_{x_j}^N$ – гистограммная оценка вероятности случайной величины x_j при *N* выборках, P_{x_j} – действительная вероятность того, что величина x_j принадлежит интервалу $(n_{k-1}, n_k]$ разбиения гистограммы. Если сигнал является стационарным, то ее можно получить экспериментально по большому числу данных, например, по выборке объемом $K>10^6$,

N – число отсчетов в анализируемом интервале, $N \leq K$.

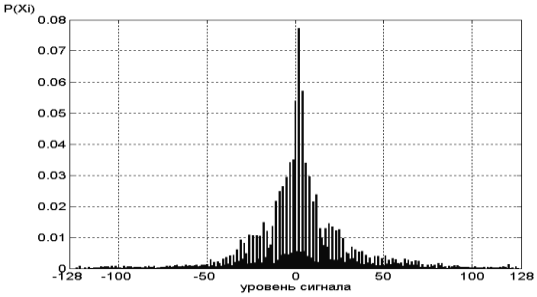
Соответственно, относительная погрешность ε определяется выражением [2, 5, 7]

$$\varepsilon = \frac{1}{2^{n+1}} \sum_{j=-2^n+1}^{2^n-1} \frac{1}{P_{x_j}} \left| P_{x_j}^N - P_{x_j} \right| \tag{3}$$

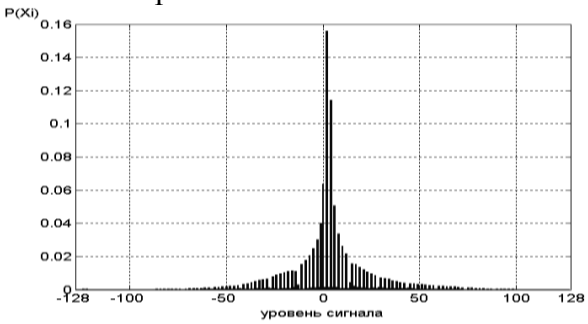
Анализ полученных результатов показал, что относительная погрешность гистограммной оценки одномерной плотности вероятностей речевого сигнала составляет менее 1% при числе выборок $N \geq 0{,}5 \times 10^5$ и фиксированном периоде дискретизации $T_Д = 91 \cdot 10^{-6} c$ [2, 6]. При $N=10^6$ относительная погрешность оценки $\varepsilon < 0{,}3\%$. Для достижения относительной погрешности 5 %, достаточно исследовать фрагмент речевого сигнала длительностью 0,299 секунды. При исследовании фрагментов речевого сигнала длительностью 30 мс и 100 мс, погрешность оценивания будет составлять 20% и 9% соответственно.



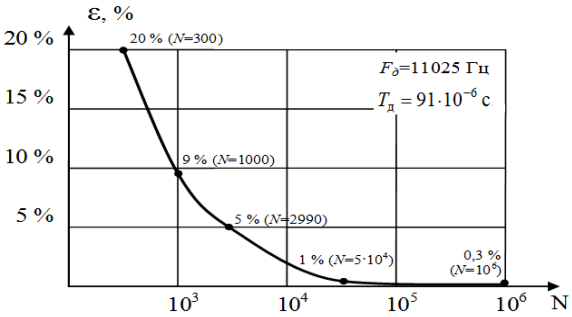
а. Интервал анализа – 500 отсчетов



б. Интервал анализа – 10000 отсчетов



в. Интервал анализа –1000000 отсчетов



г. Зависимость погрешности гистограммной оценки от времени анализа $t_a = T_д \cdot \mathrm{N}$

Рис. 1. Гистограммы выборочных значений речевого сигнала и погрешность гистограммной оценки одномерной плотности вероятностей

Восстановление плотности вероятностей речевого сигнала по эмпирическим данным

Аппроксимация полученной гистограммы может осуществляться различными способами. Помимо гамма-функции и функции Лапласа, при аппроксимации могут использоваться алгебраические и тригонометрические многочлены, многочлены по системам гауссовых и экспоненциальных функций [5, 6]. В случае алгебраических и тригонометрических многочленов, описываемых выражениями

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^{M} a_k x^{M-k}, \tag{4}$$

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^{M} \left(a_k \cos(k\alpha x) + b_k \sin(k\alpha x)\right), \tag{5}$$

задача аппроксимации заключается в нахождении их коэффициентов. Если параметр α является известным, то задача нахождения коэффициентов многочленов (4) и (5) – это задача линейной регрессии (наименьших квадратов) [5, 8], которая решается посредством минимизации квадратичной функции потерь, представляющей невязку эмпирических данных и полученной на их основе оценки.

В общем случае функцию невязки можно записать в виде

$$Q(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=0}^{M} \left(\bar{f}(x_k, \boldsymbol{\theta}) - P(x_k)\right)^2,$$

где $\bar{f}(x_k, \boldsymbol{\theta})$ – усредненная на k-ом интервале гистограммы оценка функции плотности вероятности $f(x, \boldsymbol{\theta})$, а $\boldsymbol{\theta}$ – вектор параметров, по которым осуществляется минимизация невязки, точнее, вектор коэффициентов p_k, a_k и b_k, от которых многочлены зависят линейно.

При малой величине интервала гистограммы невязку можно также записать в виде

$$Q(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=0}^{M} \left(f(x_k, \boldsymbol{\theta}) - P(x_k) \right)^2 .$$

Аналогичный вид невязки имеют и при аппроксимации гистограмм многочленами по системам гауссовых и экспоненциальных функций. При этом указанные многочлены описываются выражениями [5, 9]

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^{M} A_k e^{-\frac{(x-C_k)^2}{B_k}} , \tag{6}$$

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^{M} A_k e^{-\frac{|x-C_k|}{B_k}} . \tag{7}$$

Однако в этом случае задача минимизации невязки относится уже к задачам нелинейной регрессии, если только параметры B_k и C_k не заданы заранее. Методы нелинейной регрессии рассматриваются, например, в работах [8, 10].

Если восстанавливаемая функция плотности является гладкой, то, в принципе, заданную точность аппроксимации можно обеспечить с помощью любого многочлена из числа (4)–(5). Основной вопрос здесь состоит в выборе многочлена, имеющего наименьший порядок.

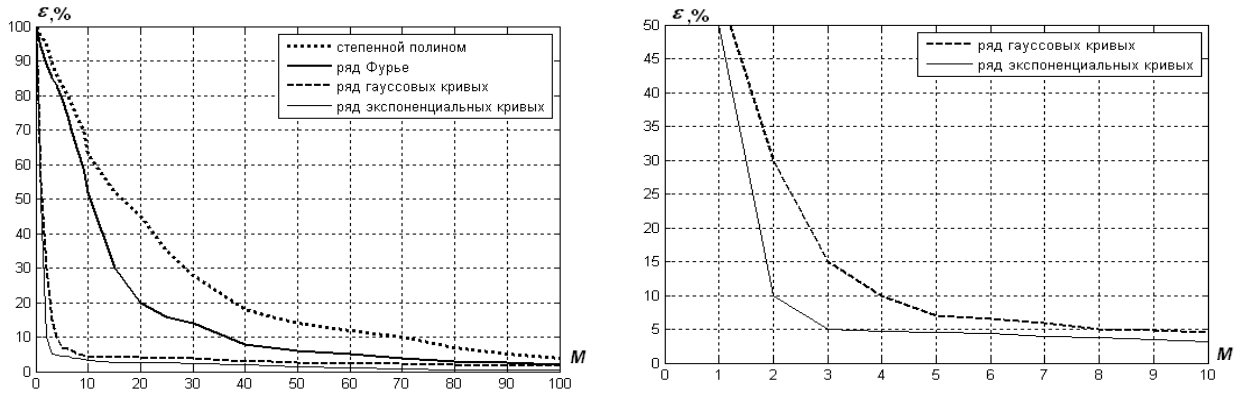
Негладкую функцию плотности можно с помощью метода локальной аппроксимации [8, 12] представить последовательностью многочленов вида (6)–(7), определенных на различных интервалах изменения аргумента. В точках сопряжения на них можно наложить дополнительные ограничения типа равенства. При этом на каждом из таких интервалов коэффициенты многочлена находятся посредством минимизации взвешенной функции невязки вида

$$Q_l(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=0}^{M} w(x_k - v_l) \left(\bar{f}(x_k, \boldsymbol{\theta}) - P(x_k) \right)^2 ,$$

где $w(x)$ – весовая функция, определяющая окно используемых данных, и v_l – величина сдвига окна данных для l – интервала аппроксимации, $l = 1, \ldots, L$. Полученная таким способом последовательность параметров $\boldsymbol{\theta}_l = \arg\min_{\boldsymbol{\theta}} Q_l(\boldsymbol{\theta})$ решает задачу аппроксимации. Очевидно, что с помощью многочлена (7) негладкую функцию можно аппроксимировать и в целом.

Как уже отмечалось, чтобы быть плотностью вероятности многочлен $f(x, \boldsymbol{\theta})$ должен быть неотрицательным, а его интеграл по области определения, равным единице. Параметры многочленов находятся в этом случае методами оптимизации с ограничениями.

Зависимости погрешности аппроксимации гистограммы речевого сигнала в целом от порядка многочленов (4)–(7) приведены на рис. 2. Погрешность определялась по формуле (3).

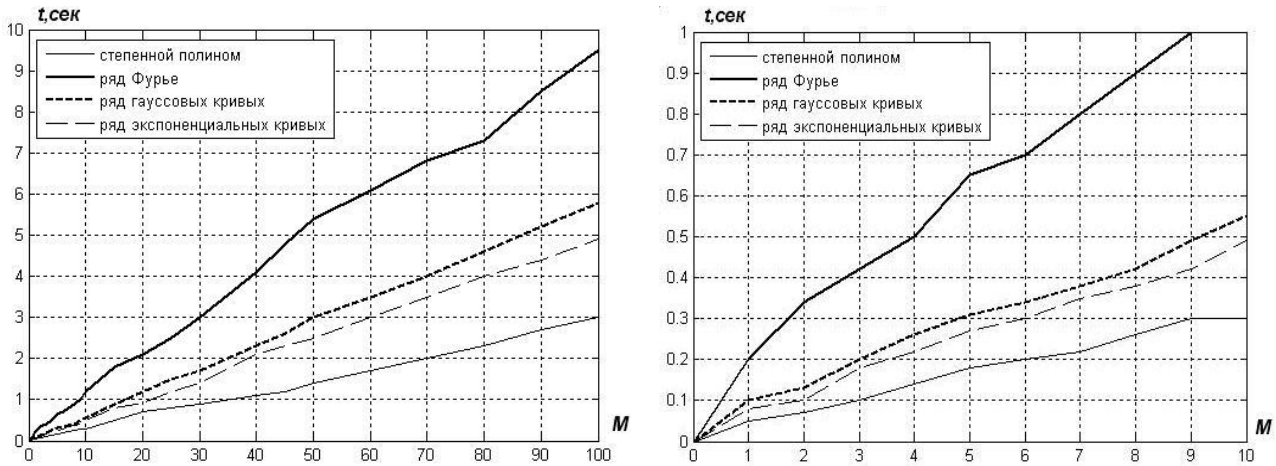


а. Порядок $M \leq 100$ б. Порядок $M \leq 10$

Рис. 2. Зависимости погрешности аппроксимации от порядка многочлена

Из рис. 2 видно, что погрешность аппроксимации $\varepsilon \leq 5$ %, если $M \geq 90$ – при использовании степенного многочлена (4), $M \geq 80$ – для тригонометрического многочлена (5), $M \geq 8$ – в случае многочлена (6) по системе гауссовых кривых и $M \geq 3$ – для многочлена (7) по системе экспонент. Относительная погрешность аппроксимации $\varepsilon = 5\%$ сопоставима при этом с погрешностью построения гистограммы речевого сигнала, что позволяет не стремиться к большей точности аппроксимации.

Вычислительные ресурсы, необходимые для аппроксимации, зависят как от размерности вектора оцениваемых параметров, так и от характера задачи оптимизации, от того, как, линейно или нелинейно зависит от них функция потерь и от того, какие ограничения налагаются на аппроксимирующую функцию. Зависимости вычислительных затрат на аппроксимацию гистограммы речевого сигнала [11] от порядка многочленов для рассмотренных выше случаев приведены на рис. 3.



а. Порядок многочлена $M \leq 100$ б. Порядок многочлена $M \leq 10$

Рис. 3. Вычислительные затраты аппроксимации гистограммы речи

Из рис. 3. видно, что при заданной точности аппроксимации $\varepsilon = 5\%$ предпочтение по вычислительным затратам следует отдать многочлену третьего порядка по системе экспоненциальных функций (7). Это обусловливает, в дальнейшем, аппроксимацию гистограмм речевых сигналов многочленами вида (7) порядка $M = 3$ [9].

Аппроксимация плотности вероятности речевых сигналов многочленом по системе экспоненциальных функций

Многочлен по системе экспоненциальных функций, используемый при восстановлении плотности вероятности, задается выражением

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^{M} A_k e^{-\frac{|x-C_k|}{B_k}}, \tag{8}$$

где A_k, B_k, C_k – коэффициенты, значения которых с помощью соответствующего алгоритма находятся из условия максимальной точности аппроксимации имеющейся гистограммы многочленом (8) [4, 5, 6].

Пусть искомая плотность вероятности является симметричной и одномодальной функцией. Если к тому же принять, что все коэффициенты смещения C_k равны между собой, то они представляют собой математическое ожидание случайного процесса, оценка которого в предположении эргодичности описывается выражением [7]

$$C_k = \overline{x(nT)} = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x(nT).$$

При этом если из наблюдаемых данных вычесть оценку $\overline{x(nT)}$ или принять в соответствии с исследованиями в [4], что $\overline{x(nT)} \approx 0$ для речевых сигналов, то получится процесс с нулевым математическим ожиданием, а многочлен (8) примет вид

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^{M} A_k e^{-\frac{|x|}{B_k}}.$$

Коэффициенты A_k и B_k находятся методом последовательных итераций, начиная с коэффициентов A_M и B_M для M-й экспоненты, которая наиболее полно представляет гистограмму в области её значений близких, к нулю. Поэтому для составления пары уравнений, с помощью которых определяются A_M и B_M, берутся аргументы $|x_{i\ \max}|$ и $|x_{i\ \max-1}|$, находящиеся в области $P(x_k)<0{,}05P(0)$, то есть в области, где значение производной оценки плотности близко к нулю, $f'(x, \boldsymbol{\theta}) \approx 0$.

При этом индексация аргументов i для экспоненты M-го порядка осуществляется по правилу $i_{max}=2M-1$.

При определении параметров экспоненты порядка (M-1) значения индексов пары аргументов $|x_i|$ и $|x_{i-1}|$ определяется выражением $i=2(M-1)-1$, причем значения аргументов $|x_i|$ и $|x_{i-1}|$ для экспоненты (M-1)-порядка

необходимо выбирать в области наибольшего перегиба функции $f(x, \boldsymbol{\theta})$, а именно в области, где вторая производная экспериментальной гистограммы близка к максимальному значению, т.е. $f''(x, \boldsymbol{\theta}) \approx \max$ [7, 13].

Для определения параметров экспоненты первого порядка аргумент $|x_1|$ выбирается в области, где экспериментальная гистограмма $P(x_k)$ имеет максимальную крутизну подъема, то есть значение аргумента $|x_1|$ находится в области значений, близких к нулю, и подчиняется условиям $|x_1|>0$ и $|x_1|\approx 0$. Значения аргумента x_0 принимается равным нулю.

Выбор областей значений аргументов и правила их индексации при определении параметров экспонент иллюстрируется на рис. 4.

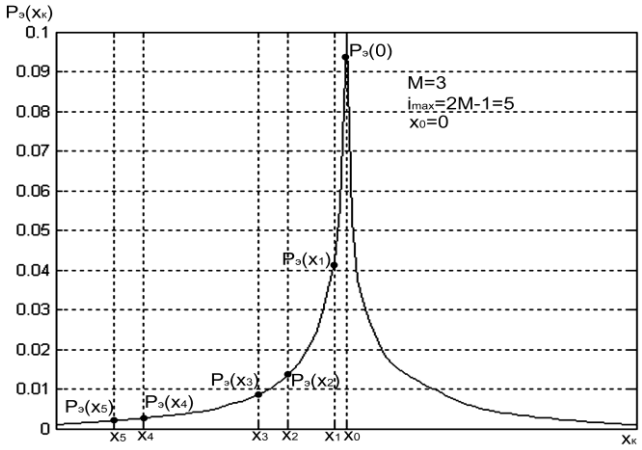


Рис. 4. Выбор и индексация аргументов x_i для определения параметров экспоненциальных функций

Процесс определения параметров начинается с предположения, что в аппроксимирующей функции имеет место только экспонента М-го порядка вида [7]

$$P(x_i) = A_M e^{-\frac{|x_i|}{B_M}}.$$

Значения параметров $A_{M-1} \div A_1$ остальных экспонент принимаются равными нулю. Решая два уравнения для аргументов $|x_{2M-1}|$ и $|x_{2M-2}|$, получаем

$$B_M = \frac{|x_{2M-2}| - |x_{2M-1}|}{\ln \frac{P(x_{2M-1})}{P(x_{2M-2})}}, \; A_M = P(X_{2M-2}) e^{\frac{|x_{2M-2}|}{B_M}}.$$

Далее определяются параметры экспоненты M-1 порядка, при этом также предполагается, что параметры $A_{M-2} \div A_1$ экспонент ряда равны нулю. Таким способом определяются A_{M-1} и B_{M-1}, при аргументах $|x_{2M-3}|$ и $|x_{2M-4}|$. Аппроксимирующая функция в этом случае имеет вид

$$P(x_i) = A_M e^{-\frac{|x|}{B_M}} + A_{M-1} e^{-\frac{|x|}{B_{M-1}}}. \qquad (9)$$

Решая два уравнения относительно $A_{M\text{-}1}$ и $B_{M\text{-}1}$, получаем

$$\frac{\left[P(x_{2M-3})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-3}|}{B_M}}\right]}{\left[P(x_{2M-4})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_M}}\right]}=e^{\frac{|x_{2M-4}|-|x_{2M-3}|}{B_{M-1}}},$$

$$B_{M-1}=\frac{|x_{2M-4}|-|x_{2M-3}|}{\ln\left[\frac{P(x_{2M-3})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-3}|}{B_M}}}{P(x_{2M-4})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_M}}}\right]}$$

$$A_{M-1}=\left[P(x_{2M-4})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_M}}\right]e^{\frac{|x_{2M-4}|}{B_{M-1}}}$$

После определения $A_{M\text{-}1}$ и $B_{M\text{-}1}$ уточняются A_M и B_M решением уравнений с помощью выражения (9) для двух аргументов. Тогда уточненные значения A'_M и B'_M получаются с помощью следующих выражений:

$$B'_M=\frac{|x_{2M-2}|-|x_{2M-1}|}{\ln\frac{P(x_{2M-1})-A_{M-1}e^{-\frac{|x_{2M-1}|}{B_{M-1}}}}{P(x_{2M-2})-A_{M-1}e^{-\frac{|x_{2M-2}|}{B_{M-1}}}}},\qquad(10)$$

$$A'_M=\left[P(x_{2M-2})-A_{M-1}e^{-\frac{|x_{2M-2}|}{B_{M-1}}}\right]e^{\frac{|x_{2M-2}|}{B'_M}}.$$

С учетом уточненных значений параметров экспоненты M-го порядка уточняются параметры $A_{M\text{-}1}$ и $B_{M\text{-}1}$ экспоненты (M-1)-го порядка, с помощью выражений (10).

Процесс уточнения должен носить циклический характер до получения минимальной погрешности, определяемой выражением

$$\frac{\overline{P(x)-P'(x)}}{\overline{P(x)}}\le\varepsilon_{\min}.$$

Затем определяются параметры $A_{M\text{-}2}$ и $B_{M\text{-}2}$ экспоненты (M-2) порядка. После получения вышеуказанных параметров, параметры экспонент M-го, (M-1)-го и (M-2)-го порядков уточняются методом циклических итераций до получения минимального значения погрешности.

В завершение определяются параметры последней экспоненты, экспоненты 1-го порядка, то есть определяются A_1 и B_1 с помощью выражения аппроксимирующей функции вида (9). При этом используется значение аппроксимирующей функции в граничных условиях, когда аргумент x_0=0. В этом случае выражение (9) принимает вид

$$P(0)=A_M+A_{M\text{-}1}+\ldots+A_2+A_1.$$

В этом уравнении неизвестным является только параметр A_1, поэтому получаем выражение для определения A_1:

$$A_1=P(0)-A_M-A_{M-1}-\ldots-A_2. \tag{11}$$

Далее составляем уравнение вида

$$P(x_1)=A_M e^{-\frac{|x_1|}{B_M}}+A_{M-1}e^{-\frac{|x_1|}{B_{M-1}}}+\ldots+A_1 e^{-\frac{|x_1|}{B_1}},$$

которое решаем относительно B_1 и получаем

$$B_1=\frac{|x_1|}{\ln\left[\dfrac{A_1}{P(x_1)-A_M e^{-\frac{|x_1|}{B_M}}-A_{M-1}e^{-\frac{|x_1|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_2 e^{-\frac{|x_1|}{B_2}}}\right]}. \tag{12}$$

После вычисления параметров A_1 и B_1 все полученные параметры экспонент уточняются следующими выражениями:

$$B'_M=\frac{|x_{2M-2}|-|x_{2M-1}|}{\ln\left[\dfrac{P(x_{2M-1})-A_{M-1}e^{-\frac{|X_{2M-1}|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_1 e^{-\frac{|x_{2M-1}|}{B_1}}}{P(x_{2M-2})-A_{M-1}e^{-\frac{|x_{2M-1}|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_1 e^{-\frac{|x_{2M-2}|}{B_1}}}\right]},$$

$$A'_1=\left[P(x_{2M-2})-A_{M-1}e^{-\frac{|X_{2M-2}|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_1 e^{-\frac{|X_{2M-2}|}{B_1}}\right]e^{\frac{|x_{2M-2}|}{B'_M}},$$

$$B'_{M-1}=\frac{|x_{2M-4}|-|x_{2M-3}|}{\ln\left[\dfrac{P(x_{2M-3})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-3}|}{B_M}}-A_{M-2}e^{-\frac{|x_{2M-3}|}{B_{M-2}}}-\ldots-A_1 e^{-\frac{|x_{2M-3}|}{B_1}}}{P(x_{2M-4})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_M}}-A_{M-2}e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_{M-2}}}-\ldots-A_1 e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_1}}}\right]},$$

$$A'_{M-1}=\left[P(x_{2M-4})-A_M e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_M}}-A_{M-2}e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_{M-2}}}-\ldots-A_1 e^{-\frac{|x_{2M-4}|}{B_1}}\right]e^{\frac{|x_{2M-4}|}{B'_{M-1}}},$$

. . . . . .

$$B'_2=\frac{|x_2|-|x_3|}{\ln\left[\dfrac{P(x_3)-A_M e^{-\frac{|x_3|}{B_M}}-A_{M-1}e^{-\frac{|x_3|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_3 e^{-\frac{|x_3|}{B_3}}-A_1 e^{-\frac{|x_3|}{B_1}}}{P(x_2)-A_M e^{-\frac{|x_2|}{B_M}}-A_{M-1}e^{-\frac{|x_2|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_3 e^{-\frac{|x_2|}{B_3}}-A_1 e^{-\frac{|x_3|}{B_1}}}\right]},$$

$$A'_2=\left[P(x_2)-A_M e^{-\frac{|X_2|}{B_M}}-A_{M-1}e^{-\frac{|X_2|}{B_{M-1}}}-\ldots-A_3 e^{-\frac{|X_2|}{B_3}}-A_1 e^{-\frac{|X_2|}{B_1}}\right]e^{\frac{|x_2|}{B'_2}}$$

Каждый цикл обеспечивает уточнение значений A_1 и B_1. Эти параметры уточняются с помощью полученных выше выражений (11) и (12). Циклические итерации уточнений завершаются при достижении заданного значения погрешности аппроксимации. Пример аппроксимации плотности вероятности

многочленом порядка M=3 для одной из реализаций речевого сигнала приведен на рис. 5.

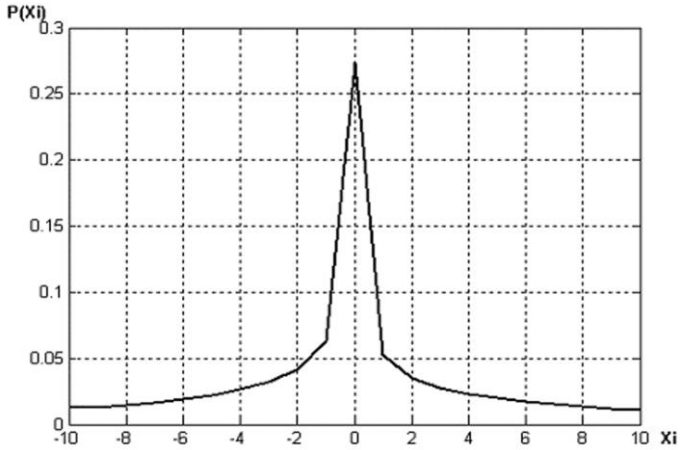


Рис. 5. Пример аппроксимации гистограммы многочленом третьего порядка по системе экспоненциальных функций при значениях параметров:
M=3, A_1 = 0.003135969, A_2 = 0.033715075, A_3 = 0.237038956,
B_1 = 9.647790078, B_2 = 7.739749293, B_3 = 0.47697697, $\varepsilon \leq 5\%$

Выводы

1. Разработан алгоритм гистограммного оценивания одномерной функции распределения плотности вероятности дискретных отсчетов речевых сигналов.

2. Исследован вопрос необходимого объема выборки для получения гистограммной оценки одномерной функции распределения плотности вероятности с заданной погрешностью.

3. Установлено, что восстанавливаемая функция плотности вероятности является гладкой и может быть аппроксимирована многочленом по системе экспоненциальных функций с наименьшим порядком. В частности, проведенные исследования показали, что погрешность аппроксимации функции плотности вероятности отсчетов речевых сигналов вышеуказанным многочленом третьего порядка составляет не более 5%.

Литература

1. Рабинер Л. Р., Шафер Р. В. Цифровая обработка речевых сигналов. – М.: Радио и связь. 1981. 496 с.

2. Кропотов Ю. А. Временной интервал определения закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 6. – С. 97–98.

3. Кропотов Ю. А. Аппроксимация закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // 16 Международная конференция «Микроволновые и телекоммуникационные технологии» (CriMiCo). Севастополь. 2007.Т. 1. С. 422–425.

4. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Погрешность при определении закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвуз. сб. науч. тр. / Под

ред. А.Н.Пылькина – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. С. 70–74.

5. Кропотов Ю. А. Экспериментальные исследования закона распределения вероятности амплитуд сигналов системы передачи речевой информации // Проектирование и технология электронных средств. 2006. Т. 4. С. 37–42.

6. Кропотов Ю. А., Кульков Я. Ю. Аппроксимация закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 11. С. 63–65.

7. Кропотов Ю. А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2007. № 3. С. 44–47.

8. Кропотов Ю.А., Ермолаев В.А. Методы оптимизации в задачах локальной аппроксимации сигналов // В мире научных открытий. 2010. № 6.1 (12). С. 44–47.

9. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы передачи речевой информации // Проектирование и технология электронных средств. 2007. № 2. С. 30–34.

10. Ермолаев В. А. Об оценивании функций распределения и стабилизации характеристик случайных процессов релейными системами // Приборы и системы управления. 1997. № 4. С. 36–37.

11. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 60–65.

12. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61–63.

13. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. №1. С. 46–50.

References

1. Rabiner L. R., Schafer R. W. *Digital processing of speech signals*. Prentice Hall, 1978.

2. Kropotov Y. A. The Time Interval of a Definition the Regularity Distribution Probability Amplitudes of Speech Signals. *Radiotehnika*, 2006, no. 6, pp. 97–98 (In Russia)

3. Kropotov Y. A. Approximation of the Laws of the Probability Distribution of the Amplitudes of the Speech Signal. *Proceedings of 16-th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Tecnology"*. Sevastopol, 2007, vol. 1, pp. 422–425 (In Ukraine).

4. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Pogreshnost' pri opredelenii zakona raspredeleniia veroiatnosti amplitud rechevogo signala [The Error of Law in Determining the Probability Distribution of the Amplitude of the Speech Signal]. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitel'nykh system. Mezhvuzovyi sbornik nauchnykh trudov* [Mathematical and software of computer systems].

Moscow, Gorjachaja linija-Telekom, 2006, pp. 70–74 (In Russia).

5. Kropotov Y. A. Experimental Study of the Law of Probability Distribution of the Signal Amplitudes of the Transmission of Voice Information. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2006. № 4. pp. 37–42 (In Russia).

6. Kropotov Y. A., Kulikov Ya. Yu. The Approximation a Regularity Distribution Probability Amplitudes of Speech Signals. *Radiotehnika*, 2006, no. 11, pp. 63–65 (In Russia).

7. Kropotov Y. A. The Algorithm of Definition of Parameters of a Exponential Approximation of the Law of Distribution of Probability of Amplitudes of a Speech Signal. *Radiotehnika*, 2007, no. 3, pp. 44–47 (In Russia).

8. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Optimization Methods in Tasks of the Local Signals Approximations. *In the World of Scientific Discoveries*, 2010, no. 6.1, pp. 44–47 (In Russia).

9. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Model Law Probability Distribution of the Signal Amplitudes in the Basis of Exponential Functions of the Transmission of Voice Information. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2007, no 2, pp. 30–34 (In Russia).

10. Ermolaev V. A. Ob otsenivanii funktsii raspredeleniia i stabilizatsii kharakteristik sluchainykh protsessov releinymi sistemami [Estimation of Distribution Functions and Stabilizing Characteristics of Random Processes Relay System]. *Pribory i sistemy upravlenija* [Instruments and Monitoring Systems], 1997, no. 4, pp. 36–37 (In Russia).

11. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algorithm of suppression of acoustic noise and the concentrated hindrances with formant band distribution rejection. *Voprosy radiojelektroniki*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60–65 (In Russia).

12. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approximation of the distribution law of probability of countings of signals of acoustic noise interferences. *Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 2, pp. 61–63 (In Russia)

13. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. On the correlation estimation of parameters of models of acoustic echo-signals. *Voprosy radiojelektroniki, serija OT*, 2010, no. 1, pp. 46–50 (In Russia).

Статья поступила 3 ноября 2015 г.

Информация об авторе

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

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

Model-Dimensional Probability Density Function of the Speech Signal

Y. A. Kropotov

Purpose. *Telecommunications systems operate in complex interference. When designing telecommunication systems audio exchange necessary to possess a priori information on the statistical characteristics of the signals. It is also necessary to create effective models of signals and interference with reduced accuracy. The article deals with one-dimensional probability density function of speech signals. An algorithm for evaluation of the one-dimensional histogram of the probability density function of the digitized samples of speech signals. The author discussed the restoration of the probability density of speech signals from empirical data. Spend development approximating the probability density distribution of speech signals polynomial system of exponential functions. An iterative method for calculating the coefficients of the polynomial approximation of the exhibitor.* ***Methods.*** *Histogram method of evaluating the probability density function, the probability density recovery method from empirical data, optimization method, a method of minimizing the weighted residual function, method of successive iterations, the local approximation method.* ***Results****: We have developed a recursive algorithm for determining the parameters of a polynomial system of exponential functions. This algorithm is designed to approximate the one-dimensional probability density distribution of speech signals. Its use provides error recovery probability density of less than 5%.*

Key words: *model of function, speech signals, probability density, histogram evaluation.*

Information about Author

Yurij Anatolievich Kropotov – Dr. habil. of Technical Sciences, Professor. Head of Chair «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 658.652 (018)

Достоверность результатов многопараметрического измерительного контроля

Данилевич С. Б.

Постановка задачи: *при разработке методик контроля сложных объектов необходимо обоснованно устанавливать требования к точности измерений каждого контролируемого параметра и оценивать достоверность результатов контроля, которая зависит также от числа контролируемых параметров изделия.* ***Цель работы*** *– предложить метод исследования зависимости достоверности контроля от точности измерений и числа контролируемых параметров.* ***Используемый метод исследования*** *– имитационное моделирование (метод Монте-Карло).* ***Новизна работы****: предложен эффективный метод вычисления показателей достоверности многопараметрического контроля основанный на имитационном моделировании. Метод имитационного моделирования позволяет экспериментально исследовать зависимость показателей достоверности измерительного контроля от неопределенности измерения и числа контролируемых параметров и установить эффективные значения этих характеристик методики контроля.* ***Результаты:*** *экспериментально исследована зависимость показателей достоверности контроля от основных влияющих факторов. Было получено, что риск заказчика прямо пропорционален числу контролируемых параметров. Показано, что вероятность ошибки контроля второго рода (в отличие от риска заказчика) снижается с увеличением числа контролируемых параметров.* ***Практическая значимость.*** *Предложенный метод целесообразно использовать при разработке эффективных методик метрологической поверки измерительных приборов, методик контроля сложных технических изделий, и при оптимизации методик контроля по экономическим критериям.*

Ключевые слова*: контроль качества, достоверность контроля, риски заказчика и производителя, ошибка контроля второго рода, имитационное моделирование.*

Актуальность

При разработке методик контроля качества сложных изделий необходимо оценивать достоверность результатов контроля. Эффективными признаются те методики, которые обеспечивают требуемую достоверность контроля при минимальных затратах на контроль [1–3]. Оценка достоверности результатов контроля нескольких идентичных параметров актуальна, например, при разработке эффективных методик метрологической поверки измерительных приборов, поверяемых в нескольких точках диапазона измерения.

Постановка задачи

Качество контроля определяется показателями достоверности его результатов, а эти показатели в свою очередь зависят от точности измерений и числа контролируемых параметров. Поэтому при разработке методик контроля необходимо оценивать достоверность получаемых результатов и обоснованно устанавливать требования к точности измерений и числу контролируемых параметров изделий.

В данной статье приведены результаты исследования зависимости показателей достоверности измерительного контроля сложных изделий от точности измерений при контроле и от числа контролируемых параметров изделий, полученные методом имитационного моделирования.

В качестве показателей достоверности контроля использованы риски заказчика $R_з$ и производителя $R_п$, а также вероятность ошибки контроля второго рода P_2 [3, 4].

Риск заказчика $R_з$ – это вероятность, характеризующая среднюю долю негодных изделий среди всех признанных в результате контроля годными (и поступающих заказчику) изделий. Риск производителя $R_п$ – вероятность, характеризующая среднюю долю ошибочно забракованных, но фактически годных изделий от общего числа поступивших на контроль изделий.

Вероятность ошибки контроля второго рода P_2 характеризует среднюю долю принятых при контроле, но фактически негодных изделий от общего числа всех поступивших на контроль негодных изделий.

В качестве показателя точности измерений использовалась неопределенность измерения U.

Пример. Рассмотрим результаты исследования влияния неопределенности измерения и числа контролируемых параметров изделий на вероятности $R_з$, $R_п$. и P_2, полученные с использованием описанной в [5–7] имитационной модели сплошного многопараметрического контроля.

Предполагалось, что качество каждого изделия характеризуется I независимыми идентичными параметрами X_i (i=1,…I), которые подлежат контролю. Было принято, что контролируемые параметры X_i – нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием, совпадающим с номинальным значением, и среднеквадратичным отклонением (СКО) σ. Предельное допускаемое отклонение от номинального значения у каждого параметра было принято равным ±3.

В таблицах приведены результаты, полученные при компьютерном моделировании процедуры контроля $2 \cdot 10^6$ изделий для двух моделей изделий. В таблице 1 приведены оценки искомых показателей достоверности, полученные при σ = 1, а в таблице 2 – при σ = 0,8.

Таблица 1 – Оценки показателей достоверности контроля при σ = 1

Показатели достоверности контроля (%)	Число контролируемых параметров I	Неопределенность измерения U		
		0,1	0,2	0,3
$R_з$	3	0,1	0,17	0,23
	10	0,33	0,56	0,71
	30	0,98	1,65	2,13
	100	3,22	5,43	6,92
$R_п$	3	0,14	0,33	0,59
	10	0,45	1,08	1,95
	30	1,25	3,04	5,4
	100	3,4	7,96	13,90
P_2	3	11,9	20,7	27,4
	10	11,8	20,2	25,6
	30	11,4	19,2	24,3
	100	10,2	16,5	19,7

Таблица 2 – Оценки показателей достоверности контроля при σ = 0,8

Показатели достоверности контроля (%)	Число контролируемых параметров *I*	Неопределенность измерения *U*		
		0,1	0,2	0,3
$R_з$	3	0,01	0,02	0,02
	10	0,03	0,04	0,06
	30	0,09	0,14	0,18
	100	0,29	0,47	0,60
$R_п$	3	0,01	0,04	0,09
	10	0,05	0,14	0,28
	30	0,15	0,40	0,85
	100	0,51	1,36	2,82
P_2	3	17,2	27,0	33,9
	10	16,1	26,2	32,5
	30	16,6	25,9	32,2
	100	16,7	26,1	31,8

Расчеты в таблицах 1 и 2 выполнены для числа контролируемых параметров *I* = 3, 10, 30 и 100 при следующих трех значениях неопределенности измерения контролируемых параметров: *U* = 0,1; 0,2 и 0,3.

На рисунках 1–6 приведены зависимости указанных показателей достоверности контроля от числа контролируемых параметров при трех значениях неопределенности измерения параметров.

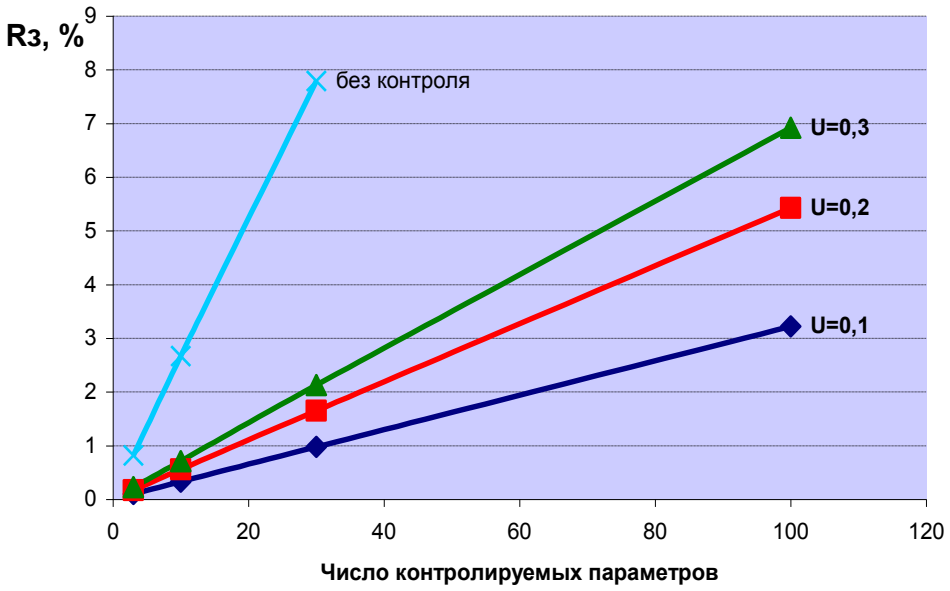


Рис. 1. Зависимость $R_з$ от числа контролируемых параметров изделий при σ = 1

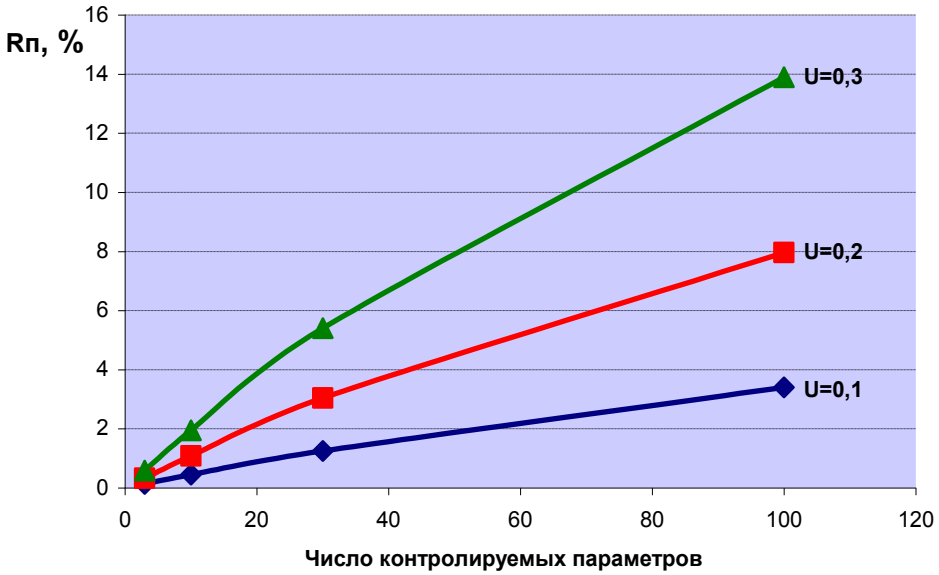


Рис. 2. Зависимость $R_п$ от числа контролируемых параметров изделий при σ = 1.

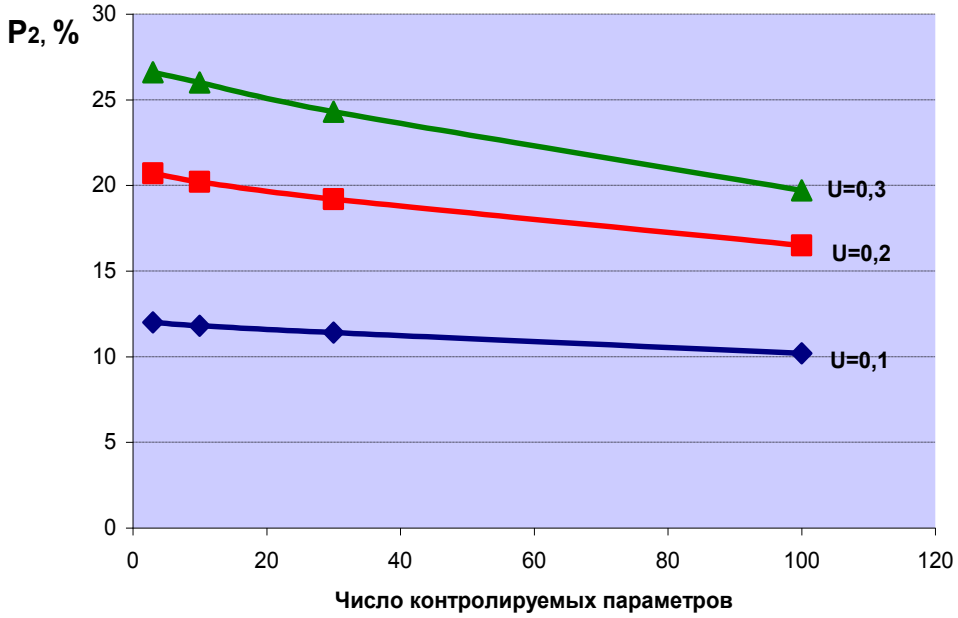


Рис. 3. Зависимость P_2 от числа контролируемых параметров изделий при σ = 1

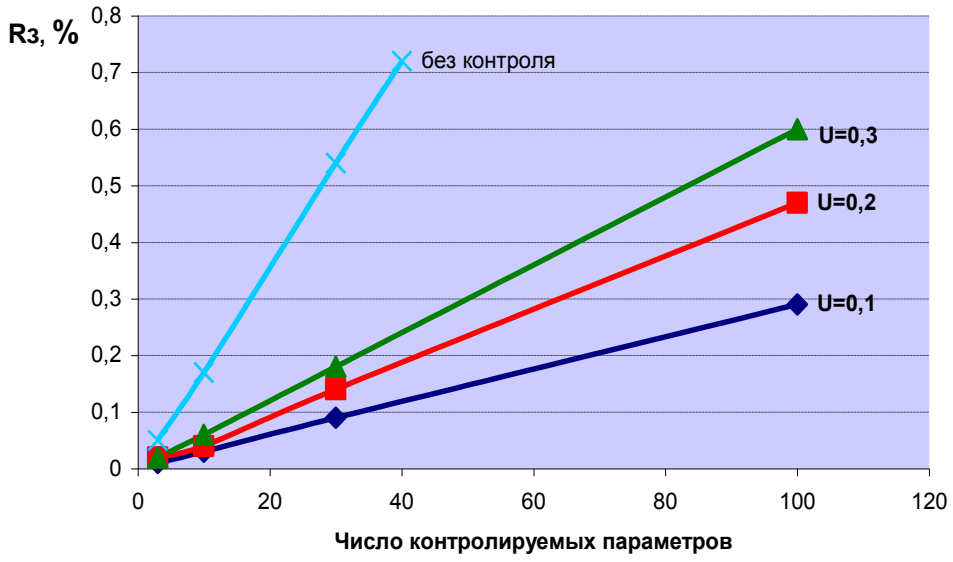


Рис. 4. Зависимость $R_з$ от числа контролируемых параметров изделий при σ = 0,8

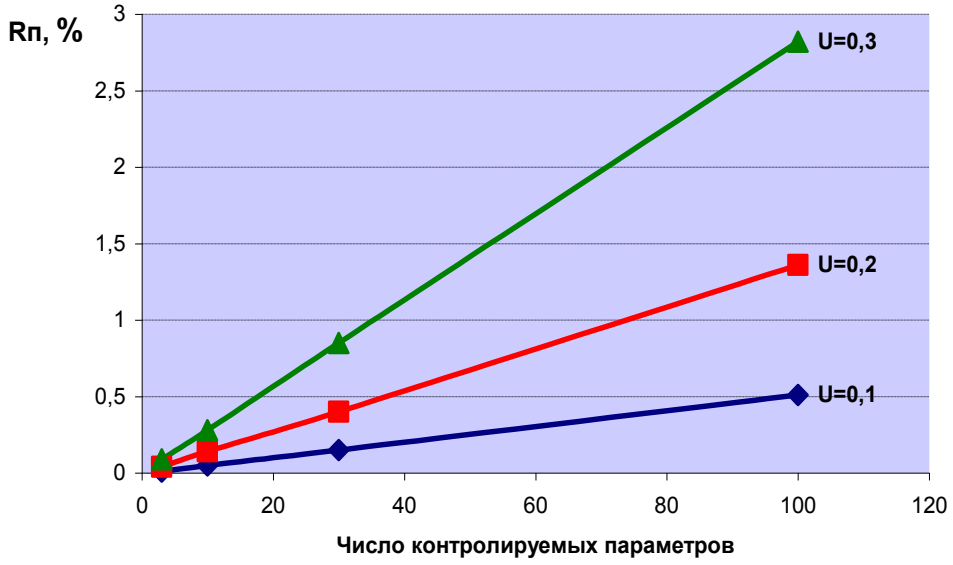


Рис. 5. Зависимость $R_п$ от числа контролируемых параметров изделий при σ = 0,8

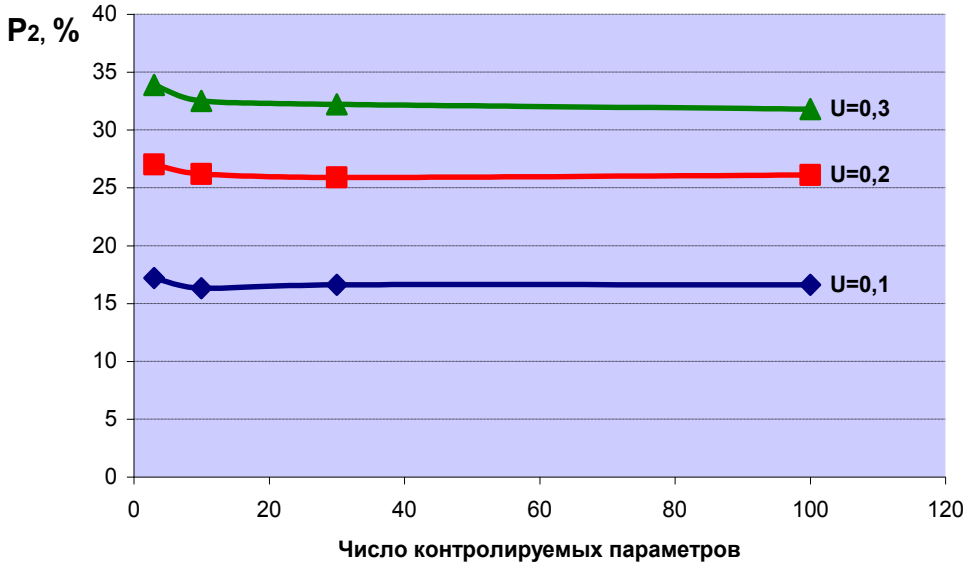


Рис. 6. Зависимость P_2 от числа контролируемых параметров изделий при σ = 0,8

Отметим, что при отсутствии контроля и при σ = 1 вероятность «негодности» изделия, качество которого характеризуется одним параметром (вероятность выхода этого параметра за допуск) равна 0,27%, качество которого характеризуется тремя параметрами – 0,82%, десятью параметрами – 1,67%, тридцатью параметрами – 7,79%, ста параметрами – 23,7%. Это совпадает с результатами, приведенными в [8].

При отсутствии контроля при СКО параметров σ =0,8 вероятность «негодности» изделия, качество которого характеризуется тремя параметрами ~ 0,05%, десятью параметрами ~ 0,17%, тридцатью параметрами – 0,54%, ста параметрами – 1,75%.

В случае если контроль отсутствует, зависимости средней доли негодных изделий в партии от числа контролируемых параметров изделий представлены на рис. 1 и рис. 4 (выделено голубым цветом).

Используя полученные результаты, можно найти искомые показатели достоверности контроля при различном числе контролируемых параметров и различной точности выполняемых при контроле измерений.

Пусть технология изготовления изделий обеспечивает σ = 1, неопределенность измерения при контроле $U = 0{,}2$, а число идентичных контролируемых параметров каждого изделия $I = 50$.

Из рисунков 1, 2 и 3 методом интерполяции найдем, что значение $R_з$ ~2,8%, $R_п$ ~ 4,5%, а P_2 ~ 18%. Это означает, что доля «негодных» изделий в партии, прошедшей контроль, в среднем составляет 2,8%, а доля ошибочно забракованных, но годных изделий составляет 4,5% от всех поступивших на контроль изделий. Вероятность P_2 ошибочно признать годным любое поступившее на контроль «негодное» (хотя бы по одному параметру) изделие при этом составляет 18%.

Повышение точности измерений при контроле позволит повысить достоверность его результатов. Так, при $U = 0{,}1$ из рисунков 1–3 найдем, что $R_з$ ~1,6%, $R_п$ ~1,9%, а P_2 ~12%.

Выводы

Анализ вышеприведенных результатов позволяет сделать следующие итоговые выводы:

1) Метод имитационного моделирования позволяет экспериментально исследовать зависимость показателей достоверности измерительного контроля от неопределенности измерения и числа контролируемых параметров и установить эффективные значения этих важных характеристик методики контроля (с учетом качества контролируемых изделий, характеризуемым параметром σ).
2) Риск заказчика $R_з$ прямо пропорционален числу контролируемых параметров, причем эта зависимость близка к линейной (при принятых значениях неопределенности измерения).
3) Вероятность ошибки контроля второго рода P_2 существенно зависит от неопределенности измерения U и значения СКО контролируемых параметров σ (это следует из сравнения рис. 1–3 и рис. 4–6).
4) Вероятность ошибки контроля второго рода (в отличие от риска заказчика) несколько снижается с увеличением числа контролируемых параметров.
5) Риск производителя $R_п$ существенно зависит как от погрешности измерений при контроле, так и от числа контролируемых параметров.
6) Метод имитационного моделирования может быть использован не только при разработке эффективных методик контроля сложных технических изделий, но и при оптимизации методик контроля по экономическому критерию [9, 10].

Литература

1. Рубичев Н. А., Фрумкин В. Д. Достоверность допускового контроля качества. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 171 с.

2. Гаврилов Б. М. Метрологическое обеспечение методик выполнения контроля в Минатоме России // Главный метролог. 2004. № 3. С. 27–28.

3. Данилевич С. Б., Колесников С. С. Разработка методик эффективного контроля сложных объектов // Измерительная техника. 2007. № 5. С. 19–22.

4. Данилевич С. Б. О показателях качества допускового контроля // Методы оценки соответствия. 2013. № 12. С. 20–21.

5. Данилевич С. Б., Колесников С. С., Пальчун Ю. А. Применение имитационного моделирования при аттестации методик контроля и испытаний // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 70–73.

6. Данилевич С. Б. Разработка методик измерительного контроля методом имитационного моделирования // Компетентность. 2015. № 4. С. 51–54.

7. Данилевич С. Б. Разработка эффективных методик контроля и испытаний продукции. Монография. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 120 с.

8. Розно М. И. Откуда берутся неприятности // Стандарты и качество. 2002. № 11. С. 14–20.

9. Данилевич С.Б. Планирование оптимальных методик выходного контроля // Методы оценки соответствия. 2009. № 4. С. 40–42.

10. Данилевич С. Б., Соловьева Т. М. Оптимизация выходного измерительного контроля серийно выпускаемой продукции // Компетентность. 2012. № 7. С. 48–51.

References

1. Rubichev N. A., Frumkin V. D. *Dostovernost' dopuskovogo kontrolia kachestva* [Reliability of Tolerable Quality Control]. Moscow, Publishing House of Standards, 1990. 171 p. (in Russian).

2. Gavrilov B. M. Metrologicheskoe obespechenie metodik vypolneniia kontrolia v Minatome Rossii [Metrological Maintenance Techniques of Performance Monitoring in Minatom of Russia]. *Glavnyi metrolog* [Chief Metrolog], 2004, no. 3, pp. 27–28 (in Russian).

3. Danilevich S. B., Kolesnikov S. S. Development of techniques of effective control of complex objects. *Measurement Techniques*, 2007, no. 5, pp. 19-22 (in Russian).

4. Danilevich S. B. O pokazateliakh kachestva dopuskovogo kontrolia [Quality Score of Control]. *Metody otsenki sootvetstviia* [Methods of Conformity Assessment*]*, 2013, no. 12, pp. 20–21 (in Russian).

5. Danilevich S. B., Kolesnikov S. S. Palchun Y. A. The use of simulation for attestation of inspection and testing. *Measurement Technique*, 2011, no. 7, pp. 70–73.

6. Danilevich S. B. Development of techniques of measuring control by simulation. *Kompetentnost'* [Competency], 2015, no. 4, pp. 51–54 (in Russian).

7. Danilevich S. B. *Razrabotka effektivnykh metodik kontrolia i ispytanii produktsii.* [The Development of Effective Methods of Control and Product Testing]. Monograph. Novosibirsk, Publishing house of the NSTU, 2011. 120 p (in Russian).

8. Rozno M. I. Otkuda berutsia nepriiatnosti [Where are the Trouble]. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2002, no. 11, pp. 14–20 (in Russian).

9. Danilevich S. B. Planirovanie Optimal'nykh Metodik Vykhodnogo Kontrolia [Planning the optimal methods of output control]. *Metody otsenki sootvetstviia* [Methods of Conformity Assessment], 2009, no. 4, pp. 40–42 (in Russian).

10. Danilevich S. B., Solovyova T. M. Optimizatsiia vykhodnogo izmeritel'nogo kontrolia seriino vypuskaemoi produktsii [Optimizing the Output of the Measurement Control Serial Production]. *Kompetentnost'* [Competence], 2012, no. 7, pp. 48–51 (in Russian).

Статья поступила 17 ноября 2015 г.

Сведения об авторе

Данилевич Сергей Борисович – доктор технических наук, действительный член Академии проблем качества. Профессор Новосибирского филиала Академии стандартизации, метрологии и сертификации. Новосибирский филиал Академии стандартизации, метрологии и сертификации. Область научных интересов: метрологическое обеспечение производства, разработка эффективных методик контроля и испытаний продукции. E-mail: ser-danilevich@yandex.ru, sergo_dan@mail.ru

Адрес: Россия, 630049, г. Новосибирск, Линейная улица 31/1 – 33.

Reliability of Results of Multi-Parameter Measurement Control

S. B. Danilevich

Statement of the problem. *The accuracy of measurements for each controlled parameter must be set when developing methods of control of complex objects. The reliability of the test results, which depends on the number of monitored parameters should be dened also. Thus, we argue for a method of assessment based reliability control on the accuracy of measurements and the number of controllable parameters. This task is relevant.* ***Purpose.*** *We want to propose a research method dependence reliability control from the accuracy of measurements and the number of controllable parameters. We used simulation modeling based on the Monte Carlo method to achieve the objectives of the study.* ***The novelty of the work. W****e proposed an efficient method for the computation of indicators reliability of multivariable control based on a simulation model. This simulation method allows us to experimentally investigate the dependence of the reliability of indicators measuring control of uncertainty of measurement and the number of controllable parameters. Also this method allows you to set the effective value of the measurement uncertainty and the number of controllable parameters in the control method. Results: the dependence of figures of merit of control from the main influencing factors was experimentally investigated.* ***The results*** *of the study show that the risk of the customer directly proportional to the number of controlled variables and that the probability of a control error of the second kind (in contrast to the risk of the customer) decreases with increase in the number of controlled parameters.* ***Practical significance.*** *We recommend you to use the proposed method for the development of efficient methods of metrological verification of measuring devices, methods for control of complex engineering products, and optimization of inspection methods according to economic criteria.*

Key words*: quality control, reliability of the control, the risks of the customer and the manufacturer, the error control of second kind, method of simulation.*

About the Author

Sergey Borisovich Danilevich – Dr. habil. of Engineering Sciences, Member of the Academy of Quality Problems. Professor of Novosibirsk Branch of the Academy of standardization, metrology and certification (training). Novosibirsk Branch of the Academy of standardization, metrology and certification (training). Field of research: metrological provision of production, development of effective methods of control and product testing. E-mail: ser-danilevich@yandex.ru, sergo_dan@mail.ru

Address: Russia, 630049, Novosibirsk, Lineinaya Street, 31/1 – 33.

УДК 004.85

Адаптивное управление роботами с модульной конструкцией

Демин А. В.

Постановка задачи: *задача разработки систем управления для модульных роботов сталкивается с серьезными трудностями, являющимися следствием гиперизбыточности подобных систем. Существующие подходы на основе моделей обучения с подкреплением не эффективны для систем с большим числом степеней свободы. А эволюционные методы имеют серьезные ограничения, связанные с необходимостью наличия популяции роботов, что не позволяет проводить обучение и адаптацию в режиме реальной работы.* ***Целью работы*** *является разработка методов управления гиперизбыточными модульными системами, позволяющих осуществлять обучение и адаптацию подобных систем в режиме реального времени. Для решения данной задачи предлагается использовать логико-вероятностные методы извлечения знаний из данных, основанные на идеях семантического вероятностного вывода и адаптированные для задач управления.* ***Результаты:*** *в данной работе предложен новый подход к созданию обучающихся систем управления для модульных роботов, основанный на использовании свойств функциональной схожести модулей и логико-вероятностного алгоритма направленного поиска правил. Подход основан на совместном обучении управляющих модулей, начиная с поиска общих для всех модулей управляющих правил и закачивая их последующей спецификацией в соответствии с идеями вероятностного логического вывода. Основными преимуществом предложенного подхода является высокая скорость обучения и возможность обучения в режиме реальной работы, основываясь только на опыте взаимодействия системы с окружающей средой. Приведены примеры построения и обучения систем управления для трех виртуальных моделей роботов: змеевидного, многоногого и хоботовидного манипулятора. Проведенные эксперименты подтвердили высокую скорость обучения и качество управления.* ***Практическая значимость:*** *с практической точки зрения, результаты экспериментов показывают, что предложенный подход к адаптивному управлению может быть использован в задачах разработки систем управления интеллектуальными агентами – программными или робототехническими системами, в том числе гиперизбыточными, от которых требуется возможность обучения и приспособления к изменяющимся обстоятельствам.*

Ключевые слова: *система управления, обнаружение закономерностей, извлечение знаний.*

Введение

В настоящее время активно развивается новое направление в робототехнике под названием «модульные роботы» [1, 2]. Основная идея данного подхода – конструирование роботов из множества простых однотипных модулей, которые сами по себе обладают небольшой подвижностью, но, соединяясь друг с другом, способны образовывать сложные механические системы с большим числом степеней свободы.

Подобные роботы обладают целым рядом интересных возможностей, превосходящих способности традиционных роботов. Во-первых, это возможность создания различных конструкций из одних и тех же модулей, что позволяет решать различный задачи, используя один и тот же набор модулей. Это намного выгоднее и удобнее, чем создавать множество специализированных роботов под каждую конкретную задачу. Более того, появляется возможность создания роботов-трансформеров, самостоятельно меняющих конструкцию в зависимости от задач и условий окружающей среды. Во-вторых, модульная структура и наличие большого количества степеней свободы (гиперизбыточность) позволяет создавать отказоустойчивые модели.

Выход из строя отдельных модулей такого робота не является критичным для работы всей системы и вызывает минимальное ухудшение рабочих характеристик. В-третьих, производство и использование подобных роботов экономически выгодно, поскольку однотипные модули проще и дешевле в изготовлении и ремонте.

Однако широкие возможности модульных роботов, связанные с гиперизбыточностью, имеют и обратную сторону – значительную сложность в управлении. В частности, актуальной задачей является создание системы управления движением для уже заданной конфигурации робота. В то время как для обычных роботов традиционным подходом к созданию систем управления является ручное программирование человеком-разработчиком, для модульных роботов подобный подход оказывается малоэффективным. Из-за наличия большого количества степеней свободы разработчику крайне трудно заранее предусмотреть и запрограммировать все возможные формы двигательной активности и ситуации, когда их необходимо применять, и в особенности – учесть возможность адаптации в случае поломки отдельных модулей или неожиданного изменении окружающей среды. Поэтому становиться актуальным разработка способов автоматического порождения системы управления на основе различных моделей обучения.

Однако использование популярных методов, таких как обучение с подкреплением (Reinforcement Learning), напрямую для генерации систем управления гиперизбыточными роботами оказывается затруднительным по причине наличия большого количества степеней свободы у подобных роботов. Поэтому в настоящее время многие разработчики в основном отдают предпочтение эволюционным методам, в частности, генетическим алгоритмам и генетическому программированию, а также их комбинациям со стандартными методами обучения [3–9].

Но применение эволюционных методов также имеет недостатки, основными из которых являются следующие [10]. Во-первых, это существенное время, требуемое на проведение вычислений, поскольку на каждом эволюционном шаге каждое решение из популяции требует оценки качества управления, для чего необходимо каждое решение запустить на выполнение. Во-вторых, это практическая невозможность применения данного метода для адаптации в условиях реальной работы, поскольку для работы метода необходимо наличие популяции роботов.

В данной работе предлагается обучающаяся система управления, использующая логико-вероятностный метод извлечения знаний для генерации правил управления из опыта взаимодействия системы с окружающей средой [11–15]. Особенность предлагаемого подхода состоит в том, что система в первую очередь пытается обнаружить управляющие правила, общие для всех модулей, и только затем правила, специфичные для каждого конкретного модуля в отдельности. Эффективность подхода предлагается оценить на примере обучения типичных представителей простейших гиперизбыточных модульных роботов: змеевидного робота, многоногого робота и хоботовидного манипулятора.

Симулятор

Для проведения экспериментов с предложенной моделью управления был разработан интерактивный 3D-симулятор с графическим интерфейсом. Основное назначение программы – проведение экспериментов по управлению роботами в среде, приближенной к реальному миру. Программа обладает возможностями визуализации виртуальной среды и записью экспериментов в видео-файл. В качестве физического движка в симуляторе используется библиотека Open Dynamic Library (ODE) [16], которая позволяет моделировать динамику твердых тел с различными видами сочленений. Преимуществом данной библиотеки является скорость, высокая стабильность интегрирования, а также встроенное обнаружение столкновений. При помощи данного симулятора было построено три модели роботов: змеевидный, многоногий и хоботовидный.

Модель змеевидного робота представлена в симуляторе в виде совокупности шести одинаковых прямоугольных блоков («позвонков»), соединенных вместе при помощи универсальных сочленений (рис. 1). Все сочленения идентичны и обладают двумя угловыми двигателями («мускулами»), обеспечивающими вращение суставов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Предложенная конструкция, несмотря на простоту, обеспечивает достаточную гибкость модели и позволяет принимать характерные для биологических змей положения тела.

Рис. 1. Модель змеевидного робота

Вторая модель – многоногий робот представлена в виде конструкции из шести одинаковых модулей, связанных друг с другом жесткими сочленениями (рис. 2). Каждый модуль имеет пару Г-образных ног с правой и левой стороны соответственно. Таким образом, суммарно робот имеет двенадцать ног-конечностей. Каждая нога соединена с модулем при помощи универсального сочленения, имеющего два угловых двигателя, которые позволяют вращать ногу в суставе в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В целом, конструкция робота напоминает своим видом биологических многоножек и позволяет реализовать характерные для данного вида способы передвижения.

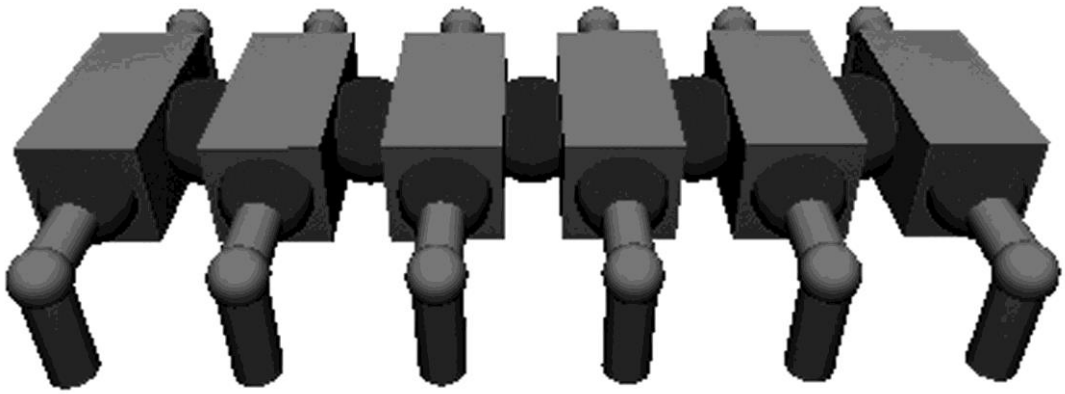


Рис. 2. Модель многоногого робота

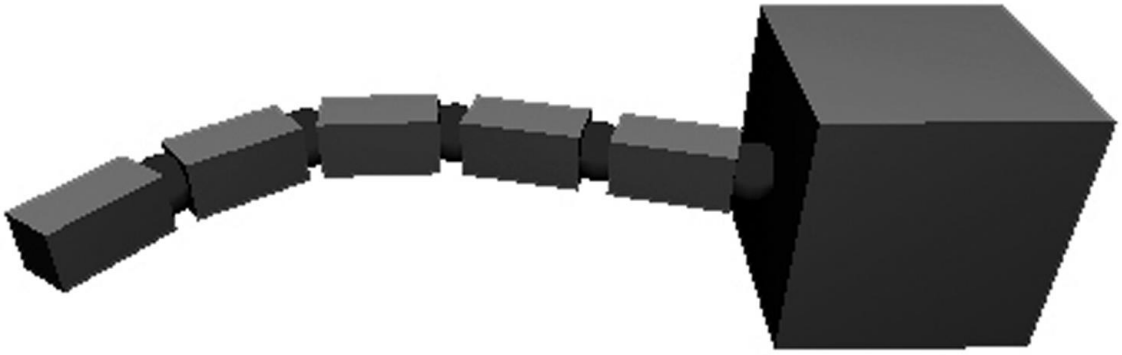


Рис. 3. Модель хоботовидного манипулятора

Модель хоботовидного манипулятора представлена в виде многосекционного «хобота», соединенного универсальным сочленением с массивной неподвижной платформой, реализованной в виде куба (рис. 3). Сам хобот представлен как последовательность пяти одинаковых прямоугольных блоков, связанных универсальными сочленениями с угловыми двигателями. Размеры блоков и позиции сочленений были подобраны таким образом, чтобы обеспечить достаточную для проведения экспериментов гибкость системы и область достижимости.

Система управления

Для создания системы управления модульными роботами предлагается использовать нейронные сети, состоящие из обучаемых логических нейронов, каждый из которых управляет отдельным модулем робота.

Логические нейроны функционируют в дискретном времени $t = 0,1,2,\ldots$. Каждый нейрон содержит некоторый набор входов $input_1,\ldots,input_k$, принимающих действительные значения, и один выход $output$, принимающий значения из заранее заданного набора $\{y_1,\ldots,y_m\}$. В каждый момент времени t на входы нейрона подается входящая информация путем присвоения входам некоторых действительных значений $input_1 = x_1,\ldots,input_k = x_k$, $x_1,\ldots,x_k \in \mathbf{R}$. Результатом работы нейрона является выходной сигнал $output = y$, $y \in \{y_1,\ldots,y_m\}$, принимающий одно из возможных значений $\{y_1,\ldots,y_m\}$.

После того, как отработают все нейроны сети, от внешней среды поступает награда. Функция награды задается в зависимости от конечной цели и служит оценкой качества управления. Задачей системы управления является обнаружение таких закономерностей функционирования нейронов, которые бы обеспечивали получение максимальной награды.

Множество закономерностей, определяющих работу нейронов, предлагается искать в виде логических закономерностей с оценками, имеющих следующий вид:

$$\forall i(P(i), X_1(i),\ldots,X_m(i), Y(i) \to r) \qquad (1)$$

где $i = 1,..,n$ – переменная по объектам - индексам нейронов.

$X_j(i) \in \mathbf{X}$ – предикаты из заданного множества входных предикатов $\mathbf{X}$, описывающих входы j нейронов N_i $(i = 1,..,n)$. К примеру, в простейшем случае данные предикаты могут быть заданы как $X_j(i) = (input_k(i) = x_r)$, где x_r – некоторые константы из области значении входящих сигналов, которые могут быть заданы, к примеру, путем квантования диапазона возможных значений соответствующих входов нейронов.

$Y_j(i) \in \mathbf{Y}$ – предикаты из заданного множества выходных предикатов $\mathbf{Y}$, описывающих выходы нейронов N_i $(i = 1,..,n)$ и имеющих вид $Y_j(i) = (output(i) = y_r)$, где y_r – некоторые константы из набора значений выходных сигналов.

$P(i) \in \mathrm{P}$ – предикаты из множества предикатов P, имеющих вид $(i = j)$, где $j = 1,..,n$, смысл которых – сужать область применения правил вида (1) до конкретных нейронов.

r – награда, максимизация которой является постоянной задачей нейрона.

Данные закономерности предсказывают, что если на вход нейрона N_i, $i = 1,..,n$ будут поданы сигналы, удовлетворяющие входным предикатам $X_1(i),\ldots,X_m(i)$ из посылки правила, и нейрон подаст на свой выход сигнал, указанный в выходном предикате $Y(i)$, то математическое ожидание награды будет равно некоторой величине r.

Отдельно отметим, что если какой-либо нейрон N_j имеет вход, специфичный только для этого нейрона, то предполагаем, что предикат $X(i)$,

описывающий этот вход, будет принимать значение «0» для всех $i \neq j$, т.е. для всех других нейронов. Аналогично, если выход какого-либо нейрона N_j может принимать некоторое значение y, характерное только для этого нейрона, то соответствующий выходной предикат $(output(i) = y)$ также будет принимать значение «0» для всех $i \neq j$.

Поясним необходимость введения множества предикатов P. В том случае, если правила (1) не содержат предикатов из P, то они будут иметь вид $\forall i(X_1(i),...,X_m(i),Y(i) \to r)$ и будут описывать закономерности, общие для всех нейронов N_i, $i = 1,..,n$. Добавление в посылку правила предиката из P автоматически суживает область применения правила до конкретного нейрона. Таким образом, правила, содержащие предикаты из P, описывают закономерности, специфичные для конкретных нейронов. Также следует отметить, что сужение области применимости правил (1) может происходить не только за счет предикатов из P, но также за счет входных либо выходных предикатов из $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$, описывающих специфичные входы либо выходы конкретных нейронов.

Для нахождения закономерностей вида (1) предлагается использовать алгоритм, основанный на идеях семантического вероятностного вывода, описанного в работах [13, 17]. При помощи данного алгоритма анализируется множества данных, хранящих статистику работы нейронной сети (вход-выход нейронов и полученная награда) и извлекаются все статистически значимые закономерности вида (1).

Рассмотрим алгоритм поиска закономерностей подробнее.

Для простоты в дальнейшем будем записывать правила (1) в упрощенном виде:

$$P, X_1,...,X_m, Y \to r. \tag{2}$$

Введем ряд формальных определений.

Перепишем правило (2) в виде $\mathrm{A}, Y \to r$, где A обозначает множество предикатов из множеств P или $\mathbf{X}$, входящих в посылку правила, т. е. $\mathrm{A} = \{P, X_1,...,X_m\}$.

Определение 1. Подправилом правила $R_1 = \mathrm{A}_1, Y \to r$, $\mathrm{A}_1 \neq \varnothing$ будем называть любое правило $R_2 = \mathrm{A}_2, Y \to r$, для которого выполнено условие $\mathrm{A}_2 \subset \mathrm{A}_1$.

Определение 2. Закономерностью будем называть правило вида (2), удовлетворяющее следующим условиям:

1. Математическое ожидание награды r для правила определено.
2. Математическое ожидание награды r правила строго больше математических ожиданий награды для каждого из его подправил.

Определение 3. Правило $R_2 = \mathrm{A}_2, Y \to r$ будем называть уточнением правила $R_1 = \mathrm{A}_1, Y \to r$, если для него выполняется одно из условий

1) $\mathrm{A}_2 = \mathrm{A}_1 \cup X$, где $X \in \mathbf{X}$ и $X \notin \mathrm{A}_1$, либо

2) $\mathrm{A}_2 = \mathrm{A}_1 \cup P$, где $P \in \mathrm{P}$ и A_1 содержит только предикаты из $\mathbf{X}$.

Т. е. R_2 будет являться уточнением R_1, если оно получено либо добавлением в посылку R_1 нового входящего предиката из $\mathbf{X}$, либо добавлением любого предиката из P, если в R_1 нет предикатов данного вида. Таким образом, суть операции уточнения состоит в конкретизации области применения правила либо путем добавления новых входных признаков, либо путем сужения применимости правила до конкретного нейрона.

Суть алгоритма обнаружения закономерностей заключается в последовательном уточнении правил, начиная с правил единичной длины, путем добавления в посылку правил новых предикатов с последующей проверкой уточненных правил на принадлежность к вероятностным закономерностям. По существу, реализуется направленный перебор правил, позволяющий существенно сократить пространство поиска. Сокращение перебора достигается за счет использования эвристики, которая заключается в том, что, начиная с момента, когда длина посылки правил достигает некоторой заданной величины, называемой глубиной базового перебора, начинается последовательное уточнение только тех правил, которые являются вероятностными закономерностями.

Перейдем к описанию алгоритма, реализующего поиск множества закономерностей, определяющих работу нейронов. Обозначим через $Spec(RUL)$ – множество всех возможных уточнений всех правил из RUL, где RUL – произвольное множество правил вида (2). Входным параметром алгоритма также является глубина базового перебора d, где $d \geq 1$ – натуральное число.

1. На первом шаге генерируем множество RUL_1 всех правил единичной длины, имеющих следующий вид $Y \to r$, $Y \in \{Y_1,...,Y_k\}$. Все правила RUL_1 проходят проверку на выполнение условий принадлежности к закономерностям. Правила, прошедшие проверку, будут являться закономерностями. Обозначим через REG_1 множество всех закономерностей, обнаруженных на первом шаге.

2. На шаге $k \leq d$ генерируется множество $RUL_k = Spec(RUL_{k-1})$ всех уточнений правил, сгенерированных на предыдущем шаге. Все правила из RUL_k проходят проверку на выполнение условий принадлежности к закономерностям. Обозначим через REG_k полученное множество закономерностей.

3. На шаге $l > d$ генерируется множество $RUL_l = Spec(REG_{l-1})$ уточнений всех закономерностей, обнаруженных на предыдущем шаге. Все правила из RUL_l проходят проверку на выполнение условий принадлежности к закономерностям. Обозначим REG_l – множество всех закономерностей, обнаруженных на данном шаге.

4. Алгоритм останавливается на шаге $m > d$, когда не обнаружено новых закономерностей $REG_m = \varnothing$.

5. Результирующее множеством закономерностей является объединение всех множеств обнаруженных закономерностей REG_i.

Шаги алгоритма $k \le d$ соответствуют базовому перебору, а шаги $k > d$ – дополнительному перебору.

Оценка математического ожидания награды для правил осуществляется по множеству данных, хранящих статистику работы системы (вход-выход нейронов и полученная награда), следующим образом:

$$r = \frac{1}{|I|}\sum_{i \in I} r_i ,$$

где I – множество событий, когда правило может быть применено, r_i – награда нейрона для i-го события, $i \in I$.

Преимущество использования семантического вероятностного вывода и правил вида (1) состоит в организации поиска правил таким образом, что сначала будут обнаруживаться правила, общие для всех нейронов, а только затем – более сложные, включающие специфичные для конкретных нейронов правила. В результате, в задачах управления модульными роботами, если хотя бы часть модулей имеет схожие функции, которые можно описать общими правилами, предложенный подход позволяет существенно сократить время поиска решения.

Функционирование нейронной сети в целом происходит следующим образом. На каждом такте работы сети на входы нейронов поступают входящие сигналы. После чего последовательно для каждого нейрона запускается процедура принятия решения, в процессе которой из множества правил, описывающих работу нейронов, выбираются те, которые применимы к текущему нейрону на текущих входных сигналах. Затем среди отобранных правил выбирается одно правило, прогнозирующее максимальное значение математического ожидания награды r. Далее на выход нейрона подается выходной сигнал $output = y$, указанный в правиле. В начальной стадии функционирования сети, когда множество правил, описывающих работу нейронов, еще пусто, либо когда нет правил, применимых к текущему набору входящих сигналов, выход нейрона определяется случайным образом. После того, как все нейроны сгенерируют свои выходные сигналы, от внешней среды поступает награда и осуществляется обучение, в процессе которого ищутся новые и корректируются текущие правила работы в соответствии с предложенным алгоритмом поиска закономерностей.

Система управления движением змеевидного робота

Целью данного эксперимента являлось обучение способам передвижения вперед простейшей модели змеевидного робота (рис. 1). В предыдущих работах [18, 19] нами была предложена модель нейронного контура управления локомоцией нематоды C.Elegans, которая показала высокую эффективность в экспериментах по обучению волнообразному способу передвижения. Схема данного контура предполагала, что головная часть нематоды выступает в качестве источника колебаний, основываясь только на обратной связи от

рецептора растяжения. Далее сигнал распространяется по телу нематоды с некоторой временной задержкой, обеспечивая тем самым характерное волнообразное движение. Поскольку конструкция змеевидного робота имеет много общих черт с моделью нематоды, то в данной работе было решено использовать похожую схему нейронного контура для управления движением робота.

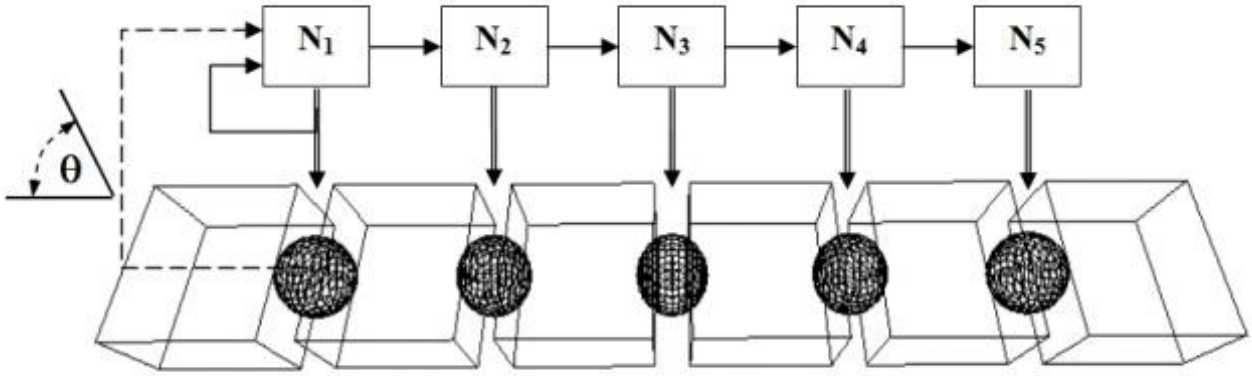


Рис. 4. Схема нейронного контура управления движением змеевидного робота

В результате был выбран нейронный контур, состоящий из 5 нейронов (рис. 4). Каждый нейрон N_i, $i = 1,...,5$ контролирует один сустав тела робота, подавая активирующие сигналы на угловые двигатели, расположенные в этом суставе. Головной нейрон N_1 получает на вход информацию об углах сгиба между головным и последующим сегментом. Помимо этого на вход нейрона по обратным связям поступает сигнал от его собственного выхода с временной задержкой Δt. Остальные нейроны N_i, $i = 2,...,5$ получают на свой вход только сигнал от выхода предыдущего нейрона N_{i-1} с временной задержкой Δt.

Множество входных и выходных предикатов для нейронов задается путем квантования диапазона возможных значений соответствующих входов и выходов нейрона. Награда для всего нейронного контура управления движением определяется в зависимости от величины скорости, которую разовьет робот на отрезке времени Δt: чем выше скорость – тем больше награда.

Используя 3D-симулятор, был проведен ряд успешных экспериментов по обучению предложенной модели способам передвижения. Как показали результаты экспериментов, системе управления удается стабильно обучаться эффективному способу передвижения вперед, основанному на волнообразном движении туловища в горизонтальной плоскости. Данный способ передвижения является самым распространенным среди биологических змей, а также характерен и для некоторых других животных, к примеру, нематод. На рис. 5 приведены найденные системой в ходе обучения оптимальные последовательности движений при перемещении вперед.

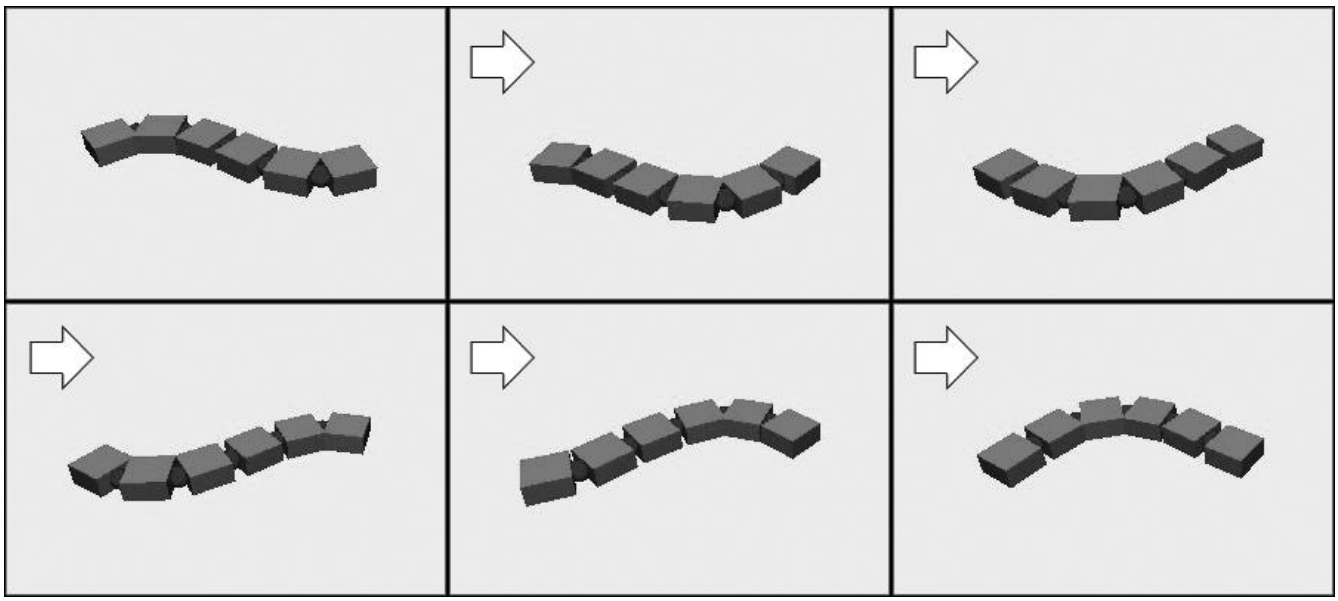


Рис. 5. Последовательность движений змеевидного робота при перемещении вперед

Система управления движением многоногого робота

В данном эксперименте была поставлена задача обучить способу движения вперед модель многоногого робота (рис. 2). Для системы управления роботом был выбран нейронный контур, состоящий из шести нейронов – по одному нейрону на каждый модуль робота (рис. 6). Каждый нейрон N_i, $i = 1,...,6$ контролирует движения левой и правой ноги своего модуля, подавая активирующие сигналы на соответствующие угловые двигатели, вращающие конечности в суставе. Чтобы немного упростить задачу, движения правой и левой ног робота были синхронизированы таким образом, что движение одной ноги всегда происходит в противофазе с другой. Т.е., к примеру, движение левой ноги вперед всегда сопровождается движением правой ноги назад. Таким образом, нейрону, по сути, достаточно контролировать движения только одной ноги, поскольку вторая нога будет повторять эти же движения, только в противофазе.

Нейрон первого модуля N_1 получает на вход информацию о положении ног первого модуля. Остальные нейроны N_i, $i = 2,...,6$ получают на свои вход данные о положении ног предыдущего модуля. Информация о положение ноги задается парой углов сгиба конечности в суставе в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Как и в предыдущей задаче множество входных и выходных предикатов для нейронов задается путем квантования диапазона возможных значений их входов и выходов. Аналогично, награда для всей системы управления движением определяется в зависимости от величины скорости, которую разовьет робот на отрезке времени Δt: чем выше скорость – тем больше награда.

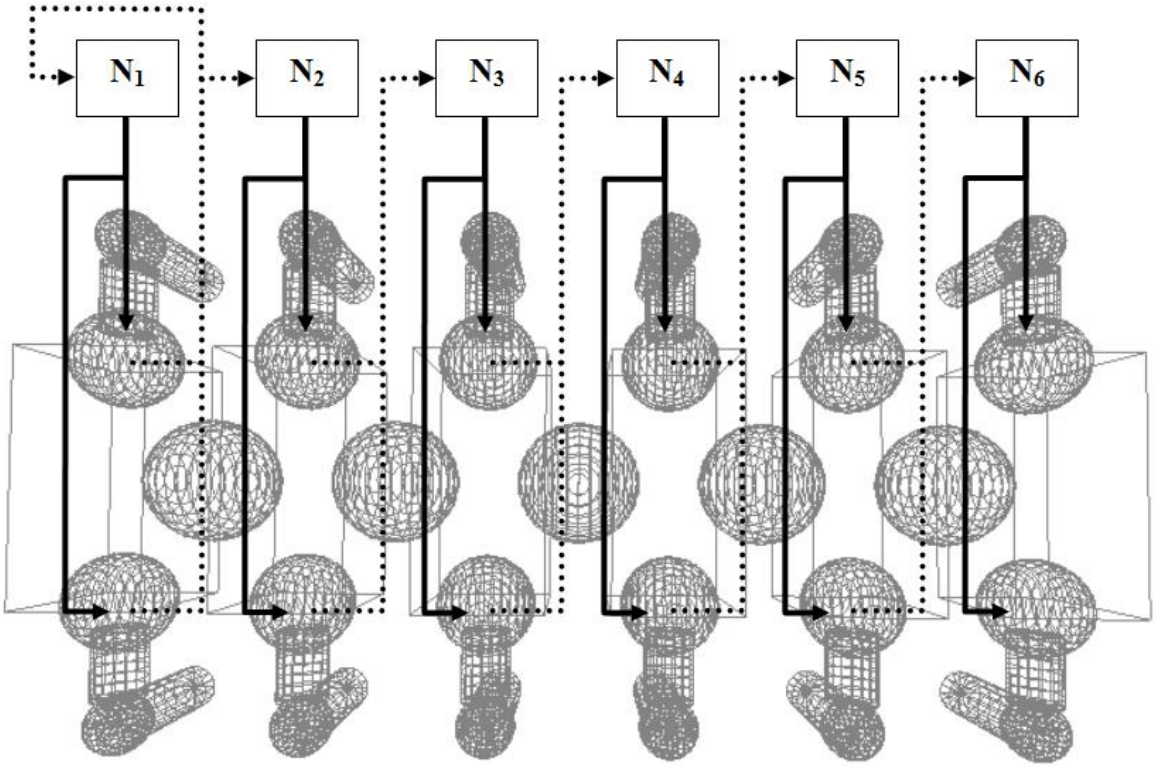


Рис. 6. Схема нейронного контура управления движением многоногого робота

При помощи 3D-симулятора была проведена серия экспериментов по обучению движению модели многоногого робота. Результаты экспериментов показали, что система управления успешно обнаруживает согласованные движения конечностей, обеспечивающие эффективное перемещение вперед. На рисунке 7 приведен пример оптимальной последовательности движений, найденной в процессе обучения.

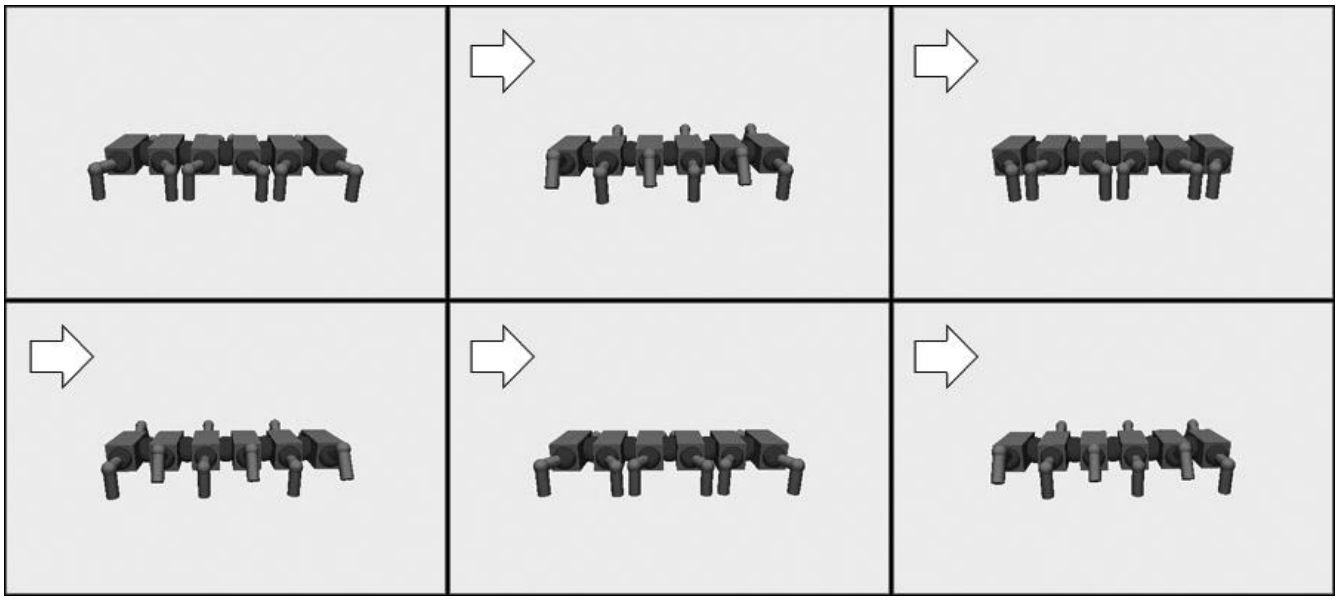


Рис. 7. Последовательность движений многоногого робота при перемещении вперед

Система управления хоботовидным манипулятором

В данном эксперименте перед манипулятором (рис. 3) была поставлена задача захватить цель, которая появляется в случайной позиции в пределах области достижимости хобота. В качестве цели выступает сфера радиусом равным длине одного сегмента хобота. Цель считается захваченной, если конец хобота (последний сегмент) окажется внутри сферы. После захвата сфера-цель исчезает и появляется в новой случайной позиции. Таким образом, эксперимент может продолжаться непрерывно неограниченное время. Задачей системы управления является обнаружение таких правил управления движением хобота, которые бы обеспечивали захват цели в любой доступной для манипулятора позиции.

Для решения данной задачи была выбрана схема управления из пяти нейронов N_i, $i = 1,...,5$, каждый из которых контролирует один сегмент хобота (рис. 8). Нейроны подают активирующие сигналы на угловые двигатели, вызывая тем самым изгиб хобота в соответствующих сочленениях. Поскольку в данной задаче цель может располагаться только на одном уровне, то все движения ограничены только горизонтальной плоскостью, что упрощает задачу.

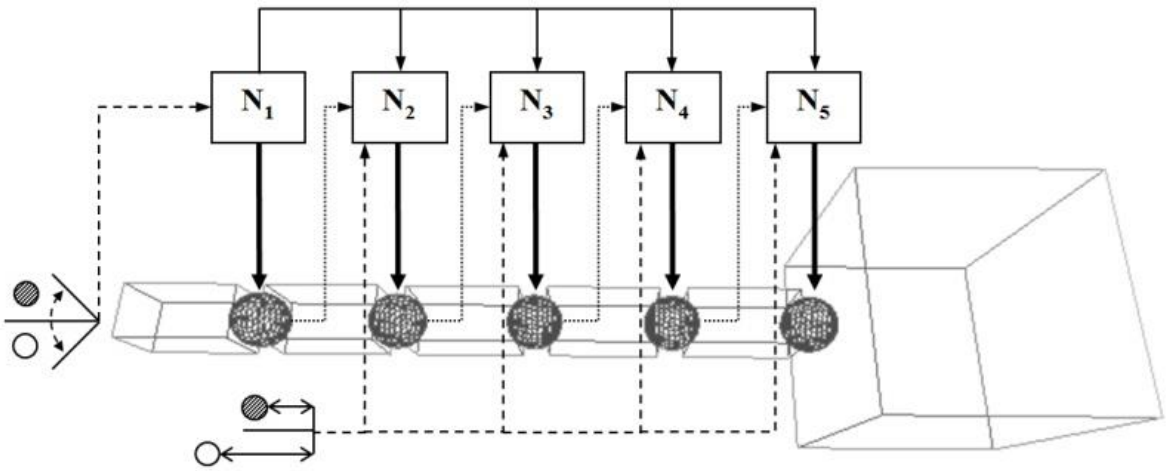


Рис. 8. Схема нейронного контура управления хоботовидным манипулятором

Первый нейрон N_1 получает на свой вход бинарную информацию о том, по какую сторону относительно хобота располагается цель: справа или слева. Остальные нейроны N_i, $i = 2,...,5$ получают на свой вход следующие сигналы:

1) информацию об угле сгиба между контролируемым и предыдущим сегментом;
2) сигнал от выхода предыдущего нейрона N_{i-1} в предшествующий момент времени;
3) бинарную информацию о положении цели по отношение к концу хобота и точки его крепления – результат сравнения расстояний от крепления до цели и от крепления до конца манипулятора.

Таким образом, в данном эксперименте манипулятор фактически «слеп», т. е. не видит точное положение цели, а только «ощущает» ее: справа-слева и ближе-дальше.

Награда для системы управления рассчитывается по факту захвата цели манипулятором следующим образом. Пусть цель появилась в новой позиции в момент времени t_0, а манипулятор захватил ее в момент времени t_1. Тогда все действия с момента времени t_0 по момент времени t_1 получать награду в размере $r = 1/(1+(t_1 - t))$, где t – момент времени, для которого рассчитывается награда. Таким образом, наибольшую награду получают самые последние действия, приведшие к достижению цели, и чем глубже в прошлом от момента захвата произошло действие, тем меньшую награду оно получает.

При помощи 3D-симулятора были проведены эксперименты по обучению системы управления манипулятором захвату целей в любой позиции в пределах зоны достижимости. Как показали результаты экспериментов, системе управления удается обнаружить эффективные правила, обеспечивающие стопроцентный захват целей в указанной зоне. На рисунке 9 приведены примеры траекторий движения уже обученного хобота при захвате цели.

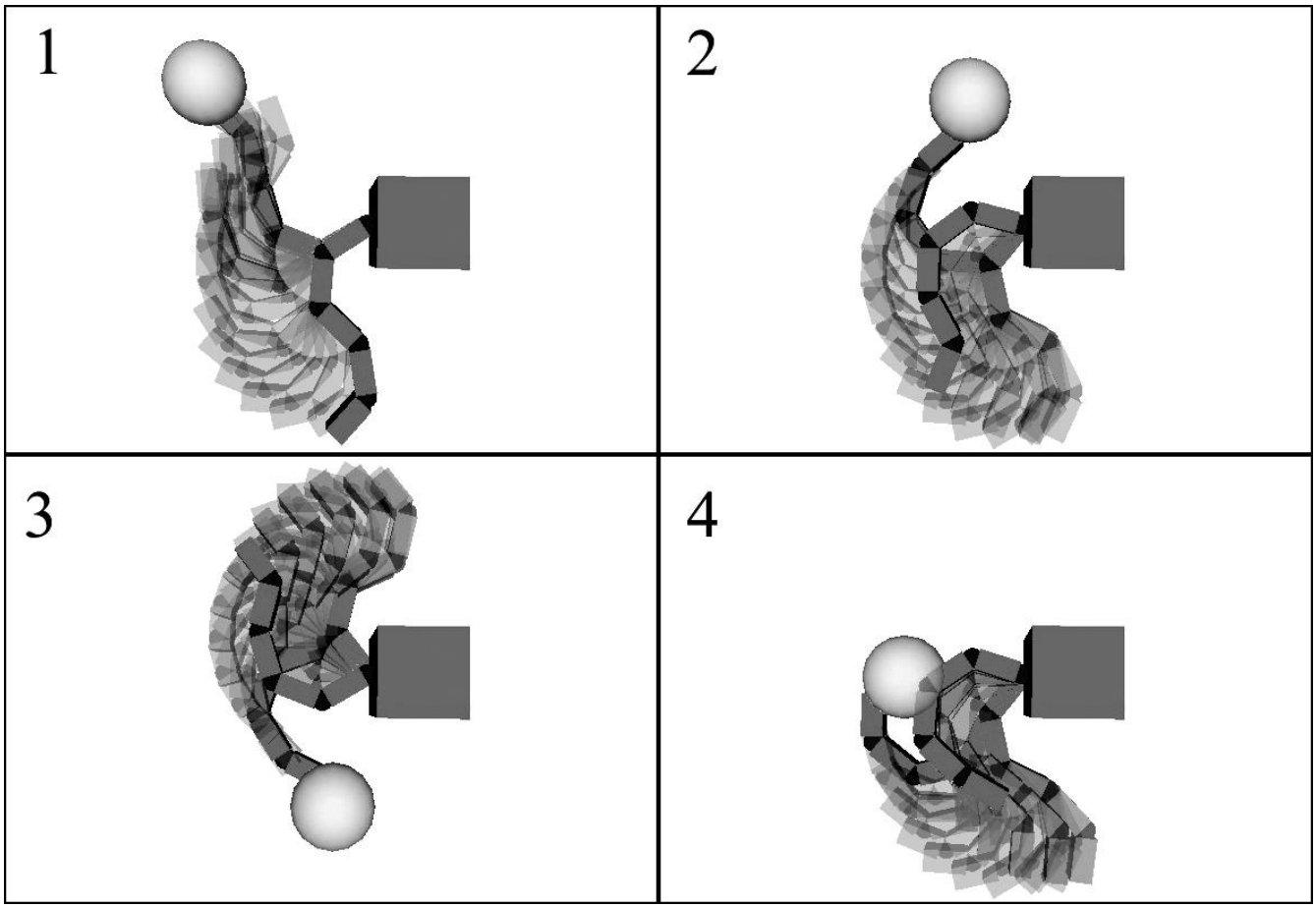


Рис. 9. Примеры траекторий движения манипулятора при захвате цели

Примеры со второго по четвертый показывают, что система управления научилась делать специальные подготовительные движения, чтобы выйти на захват. В указанных примерах стартовый изгиб хобота направлен в сторону,

противоположную цели, и для того, чтобы достичь цель, манипулятор делает волнообразное движение в другом направлении, в результате которого меняет изгиб тела на противоположное и затем успешно захватывает цель. Приведенные примеры являются демонстрацией того, что обнаруженные системой правила управления порождают достаточно сложное поведение, направленное на достижение цели.

Заключение

В данной работе предложен подход к адаптивному управлению модульными системами с большим числом степеней свободы, основанный на совместном обучении управляющих модулей, начиная с нахождения общих для всех модулей управляющих правил и закачивая их последующей спецификацией в соответствии с идеями семантического вероятностного вывода. Основными преимуществами предложенного подхода являются способность обучения в режиме реальной работы, основываясь только на опыте взаимодействия с окружающей средой, и высокая скорость обучения, которая достигается за счет эффективного использования свойств функциональной схожести модулей и алгоритма направленного поиска правил. Кроме того, предложенный подход достаточно хорошо масштабируется относительно увеличения числа модулей. В частности, добавление новых сегментов к конструкциям роботов в проведенных экспериментах слабо влияет на эффективность обучения, поскольку не изменяет количество общих для модулей правил. Однако следует отметить, что эффективность предложенного подхода во многом зависит от количества схожих по функциям модулей в схеме робота. С уменьшением доли схожих модулей преимущества от использования общих правил теряются. С практической точки зрения, проведенные экспериментальные исследования на примере моделей змеевидного и многоногого роботов, а также хоботовидного манипулятора показали, что предложенный подход является достаточно эффективным и может быть использован для управления сложными модульными системами, имеющими множество степеней свободы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-07-00386.

Литература

1. Yim M. H., Duff D. G., Roufas K. D. Modular reconfigurable robots, an approach to urban search and rescue // 1st International Workshop on Human Welfare Robotics Systems (HWRS-2000). – 2000. – pp. 19-20.

2. Stoy K., Brandt D., Christensen D. J. Self-Reconfigurable robots: an introduction // Intellegent robotics and autonomous agents series. – MIT Press, 2010. – 216 p.

3. Bongard J. C. Evolutionary Robotics // Communications of the ACM. 2013. Vol. 56. № 8. pp. 74-83.

4. Kamimura A., Kurokawa H., Yoshida E., Tomita K., Murata S., Kokaji S. Automatic locomotion pattern generation for modular robots // Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003. pp. 714-720.

5. Ito K., Matsuno F. Control of hyper-redundant robot using QDSEGA // Proceedings of the 41st SICE Annual Conference (2002). 2002. Vol. 3. pp. 1499-1504.

6. Marbach D., Ijspeert A. J. Co-evolution of configuration and control for homogenous modular robots // Proceedings of the eighth conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS 8). – IOS Press, 2004. – pp. 712-719.

7. Gong D., Yan J., Zuo G. A Review of Gait Optimization Based on Evolutionary Computation // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. 2010. Vol. 2010. 12 p. – Article ID 413179.

8. Valsalam V. K. Miikkulainen R. Modular neuroevolution for multilegged locomotion // In Proceedings of GECCO. 2008. pp. 265–272.

9. Tanev I., Ray T., Buller A. Automated Evolutionary Design, Robustness and Adaptation of Sidewinding Locomotion of Simulated Snake-like Robot // IEEE Transactions on Robotics. 2005. Vol. 21. № 4. pp. 632-645.

10. Mataric M., Cliff D. Challenges in evolving controllers for physical robots // Robotics and Autonomous Systems. 1996. № 19(1). pp. 67–83.

11. Demin A. V. Logical Model of the Adaptive Control System Based on Functional Systems Theory // Young Scientist USA. Applied science. – Auburn, Washington, 2014. – pp. 113-118.

12. Демин А. В. Модель адаптивной системы управления и ее применение для управления движением виртуального робота // Молодой ученый. 2012. № 11 (46). С. 114-119.

13. Демин А. В., Витяев Е. Е. Логическая модель адаптивной системы управления // Нейроинформатика. 2008. Т. 3. № 1. С. 79-107.

14. Демин А. В. Обучающаяся система управления движением для 3D модели многоногого робота // Молодой ученый. 2015. №19 (99). С. 74-78.

15. Демин А. В. Обучение способам передвижения виртуальной модели змеевидного робота // Молодой ученый. 2014. № 19 (78). С. 147-150.

16. Smith R. Open Dynamics Engine [Электронный ресурс]. URL: http://ode.org (дата обращения 20.11.2015).

17. Витяев Е. Е. Извлечение знаний из данных. Компьютерное познание. Модели когнитивных процессов. – Новосибирск: НГУ, 2006. – 293 с.

18. Demin A. V., Vityaev E. E. Learning in a virtual model of the C. Elegans nematode for locomotion and chemotaxis // Biologically Inspired Cognitive Architectures (2014). – Elsevier, 2014. – Vol. 7. – pp. 9-14.

19. Демин А. В. Обучающаяся модель управления хемотаксисом нематоды C.Elegans // Нейроинформатика. 2013. Т. 7. № 1. С. 29-41.

References

1. Yim M. H., Duff D. G., Roufas K. D. Modular reconfigurable robots, an approach to urban search and rescue. *1st International Workshop on Human Welfare Robotics Systems (HWRS2000)*, 2000, pp. 19-20.

2. Stoy K., Brandt D., Christensen D. J. Self-Reconfigurable robots: an introduction. *Intellegent robotics and autonomous agents series*, MIT Press, 2010, 216 p.

3. Bongard J. C. Evolutionary Robotics. *Communications of the ACM*, 2013, vol. 56, no. 8, pp. 74-83.

4. Kamimura A., Kurokawa H., Yoshida E., Tomita K., Murata S., Kokaji S. Automatic locomotion pattern generation for modular robots. *Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, pp. 714-720.

5. Ito K., Matsuno F. Control of hyper-redundant robot using QDSEGA. *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference (2002)*, 2002, vol. 3, pp. 1499-1504.

6. Marbach D., Ijspeert A. J. Co-evolution of configuration and control for homogenous modular robots. *Proceedings of the eighth conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS8)*, IOS Press, 2004, pp. 712-719.

7. Gong D., Yan J., Zuo G. A Review of Gait Optimization Based on Evolutionary Computation. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2010, vol. 2010, Article ID 413179, 12 p.

8. Valsalam V. K. Miikkulainen R. Modular neuroevolution for multilegged locomotion. *Proceedings of GECCO*, 2008, pp. 265–272.

9. Tanev I., Ray T., Buller A. Automated Evolutionary Design, Robustness and Adaptation of Sidewinding Locomotion of Simulated Snake-like Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 4, August 2005, pp.632-645.

10. Mataric M., Cliff D. Challenges in evolving controllers for physical robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 1996, no. 19(1), pp. 67–83.

11. Demin A. V. Logical Model of the Adaptive Control System Based on Functional Systems Theory. *Young Scientist USA. Applied science*, Auburn, Washington, 2014, pp. 113-118.

12. Demin A. V. Model' adaptivnoi sistemy upravleniia i ee primenenie dlia upravleniia dvizheniem virtual'nogo robota [Adaptive control system model and its application for virtual robot locomotion control]. *Young Scientist*, 2012, vol. 46, no. 11, pp. 114-119 (in Russian).

13. Demin A. V., Vityaev E. E. Logicheskaia model' adaptivnoi sistemy upravleniia [Logical model of the adaptive control system]. *Neiroinformatika [Neuroinformatics]*, 2008, vol. 3, no. 1, pp. 79-107 (in Russian).

14. Demin A. V. Obuchaiushchaiasia sistema upravleniia dvizheniem dlia 3D modeli mnogonogogo robota [Learning locomotion control system for 3D multiped robot model]. *Young Scientist*, 2015, vol. 99. no. 19, pp. 74-78 (in Russian).

15. Demin A. V. Obuchenie sposobam peredvizheniia virtual'noi modeli zmeevidnogo robota [Locomotion patterns learning in virtual model of snake-like robot]. *Young Scientist*, 2014, vol. 78, no. 19, pp. 147-150 (in Russian).

16. Smith R. Open Dynamics Engine. Available at: http://ode.org (accessed 20 November 2015).

17. Vityaev E. E. *Izvlechenie znanii iz dannykh. Komp'iuternoe poznanie. Modeli kognitivnykh protsessov* [Knowledge Discovery in Databases. Computational

Cognition. Models of Cognitive Processes]. Novosibirsk, Novosibirsk National Research State University, 2006. 293 p. (in Russian).

18. Demin A. V., Vityaev E. E. Learning in a virtual model of the C.Elegans nematode for locomotion and chemotaxis. *Biologically Inspired Cognitive Architectures (2014)*, Elsevier, 2014, vol. 7, pp. 9-14.

19. Demin A. V. Learning control model of chemotaxis for C.Elegans nematode. *Neiroinformatika [Neuroinformatics]*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 29-41 (in Russian).

Статья поступила 26 ноября 2015 г.

Информация об авторе

Демин Александр Викторович – кандидат физико-математический наук. Старший научный сотрудник. Институт систем информатики имени А.П. Ершова СО РАН. Область научных интересов: анализ данных, обнаружение закономерностей в базах данных, машинное обучение, адаптивное управление. Тел.: +7 (383) 330 66 60. E–mail: alexandredemin@yandex.ru

Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6.

Localization Adaptive Control of Robots with Modular Structure

A. V. Demin

Problem formulation: *the task of modular robot control system development implies serious difficulties being a consequence of such systems' hyper-redundancy. Existing approaches based on reinforcement learning models are non efficient for systems with many degrees of freedom. Evolutionary methods experience serious limitations associated based on necessity of having a population of robots, which does not allow learning and adapting these systems in real work conditions.* ***The purpose of this work*** *is developing hyper-redundant modular system control methods allowing for systems' real-time learning and adaptation. For solving this problem, we propose using logic-probabilistic methods for knowledge discovery from data based on semantic probabilistic inference approach ideas and adapted to control tasks.* ***Results:*** *In this paper we propose a new approach to creating learning modular robot control systems based on using modules' functional similarity properties and logic-probabilistic directional rule search algorithm. The approach is based on cooperative control modules' training, from discovering common control rules for all the modules to their subsequent specification in accordance with semantic probabilistic inference ideas. The main advantages of proposed approach are high learning speed and the ability to learn during real work based only on environment interaction experience. The examples of control system design and training has been presented for three virtual robots model: snake-like robot, multiped robot and trunk manipulator. The experiments have confirmed high learning speed and control quality.* ***Practical relevance:*** *From the practical point of view, the results of experiments have shown that the proposed approach for adaptive control can be used for the intelligent agent design tasks with agents being programs or robotic systems including hyper-redundant systems, which require the possibility of learning and adapting to changing environment.*

Key words: control system, data mining, knowledge discovery.

Information about Author

Alexandr Viktorovich Demin – Ph.D. of Physico-mathematical Sciences. Senior Research Officer. A.P. Ershov Institute of Informatics Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Field of research: Data Mining, Knowledge Discovery in Databases, Machine Learning, Adaptive control. Tel.: +7 (383) 330 66 60. E–mail: alexandredemin@yandex.ru

Address: Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentjev pr., 6.

УДК 004.9

Методы и средства управления жизненным циклом изделий машиностроения

Евгенев Г. Б., Кузьмин Б. В., Рубахина В. И.

Постановка задачи: *В настоящее время стоит задача обеспечения конкурентоспособности отечественного машиностроения. Для решения этой задачи необходимо создание отечественных систем управления жизненным циклом изделий. Такие системы должны быть основаны на принятых в стране стандартах и принципах управления производством.* ***Целью работы*** *является построение функциональной модели организационно-технической системы, отражающей все этапы создания изделий в дискретном производстве.* ***Используемые методы:*** *решение задачи заключается в построении модели на основе анализа документооборота и механизмов его реализации.* ***Новизна:*** *Впервые построена полномасштабная концептуальная модель управления жизненным циклом изделий машиностроения на основе отечественных стандартов и традиций.* ***Результат****: Апробация системы на многих предприятиях позволила существенно повысить эффективность производства.* ***Практическая значимость****: Представленное решение может быть реализовано на всех машиностроительных предприятиях с позаказным производством. Описанные методы позволяют прогнозировать и адекватно принимать оперативные и стратегические управленческие решения, снизить текущие издержки производства.*

Ключевые слова*: управление жизненным циклом изделий, проектирование технологических процессов, оперативное управление производством.*

Актуальность

Среди задач, стоящих перед нашим государством в настоящее время, особое значение имеют импортозамещение, включая информационные технологии, и повышение конкурентоспособности и эффективности машиностроения. Обе эти задачи тесно связаны с системами управления жизненным циклом изделий машиностроения (PLM систем).

Среди зарубежных PLM систем, внедряемых на российских предприятиях, следует отметить систему NX™, разработанную компанией Siemens PLM Software. Слабыми сторонами внедрения зарубежных систем в нашей промышленности являются [1]:

– довольно высокая стоимость лицензий (2–3 тыс. долларов за лицензию), внедрения и сопровождения;
– отсутствие полноценной локализации и поддержки стандартов;
– почти полное отсутствие интеграции с отечественными конструкторскими и технологическими САПР;
– сложность кастомизации (требуется большой объем программирования на C++ или Java).

Эти причины побудили отечественную компанию СПРУТ-Технология [2] разработать компоненты PLM, обеспечивающие автоматизированное проектирование (СПРУТ-ТП) и программирование (SprutCAM) технологических процессов, а также оперативно-календарное планирование и управление производством (СПРУТ-ОКП).

Эти компоненты имеют возможность совместной работы с отечественными системами автоматизированного конструирования и управления проектными данными, что обеспечивает создание полномасштабной отечественной PLM, учитывающей все российские стандарты и традиции.

Функциональная модель работы предприятия

На рис. 1 представлена общая функциональная модель работы машиностроительного предприятия при позаказном производстве. На входе мы имеем заказы, а на выходе – готовая продукция с документами для отгрузки по договору, а также отчётные бухгалтерские документы.

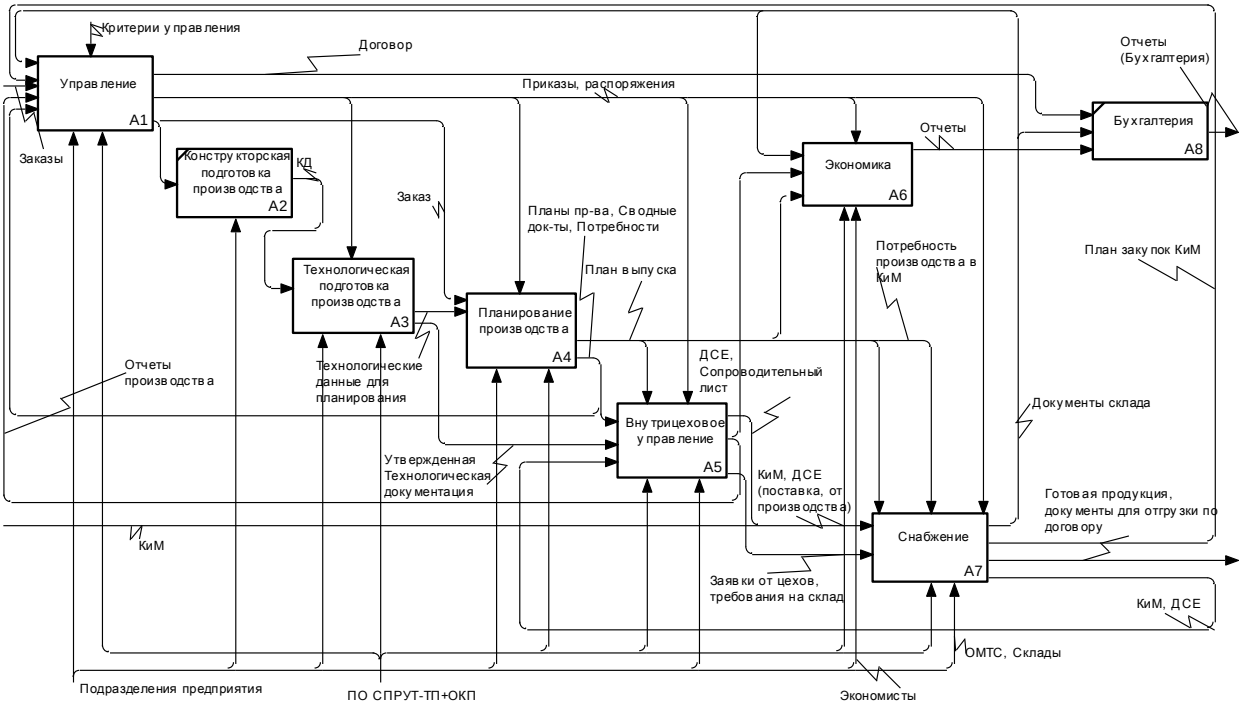


Рис. 1. Функциональная модель работы предприятия

Первым функциональным блоком диаграммы является блок «Управление». Механизмами реализации всех функциональных блоков являются соответствующие подразделения предприятия, а также программные комплексы, в качестве которых здесь рассматриваются отечественные системы проектирования технологических процессов СПРУТ-ТП и оперативно-календарного планирования СПРУТ-ОКП [2]. Работа этого блока управляется соответствующими критериями.

Заказы для производства могут быть двух категорий: проектирование и производство новых или модернизируемых изделий, либо изготовление изделий по имеющейся документации. В первом случае заказ представляется в форме технического задания в соответствии с ЕСКД, а во втором в форме спецификации заказа.

Пример спецификации заказа в СПРУТ-ТП приведен на рис. 2. В спецификации указаны наименование и обозначение заказа (изделия), а также

состав сборочных и деталей в него входящих с указаниями количества массы на штуку и общей, обозначения и ГОСТ сортамента заготовок деталей, а также марки и ГОСТ материала самих деталей с указанием норм расхода. После разработки технологических процессов изготовления деталей и сборочных единиц в этот документ заносятся их обозначения.

Результатами работы блока «Управление» являются необходимые договора, поступающие в блок «Бухгалтерия», приказы и распоряжения, управляющие работой последующих функциональных блоков, а также заказы, определяющие конструкторско-технологическую подготовку производства и его планирование.

Помимо спецификации заказа на вход блока «Управление» поступают многочисленные обратные связи от последующих блоков, необходимые для принятия управленческих решений. От блока «Снабжение» поступает план закупок комплектующих и материалов (КИМ), на основе которого разрабатываются соответствующие договора.

Спецификация заказа (изделия)

Наименование заказа (изделия): Полуплатформа
Обозначение заказа (изделия): ВАЭ-18.3.Ш.01.100

№ п/п	Примен.	Обозначение	Наименование	Куда входит: обозначение (№ чертежа)	Куда входит: кол.	Общ. кол. / Ед. изм. кол.	Масса: 1 шт.	Масса: общая	Материал: Обозначение и ГОСТ сортамента / Марка и ГОСТ материала	Материал: Код	Материал: Код. заготовки	Материал: Профиль и размеры	Кол. дет. из заг. / Единица норм.	Масса заготовки / Норма расхода	Ед. изм. массы / КИМ	Обозн. ТП / Расцеховка	Покупные	Примечание
			Сборочные единицы															
1		ВАЭ-18.3.Ш.01.100	Полуплатформа		4	4 / шт		0	/				1	0 / 0	кг	ВАЭ-18.3.Ш.01.100 ТП СБ / 63;		
2		ВАЭ-18.3.Ш.01.110	Полуплатформа		2	2 / шт		0	/						кг			
			Детали															
3		ВАЭ-18.3.Ш.01.101	Балка Швеллер 20П ГОСТ 8240 Ст 3 ГОСТ 535 L = 5450 h14	ВАЭ-18.3.Ш.01.100	8	32 / шт	100.28	3208.96	Швеллер 20 П ГОСТ 8240-97 / Ст 3 ГОСТ 14637-79	0000103	Швеллер	Швеллер 20 П 5470	1 / 1	100.65 / 100.65	кг	ВАЭ-18.3.Ш.01.101 ТП / 61; 63;		
4		ВАЭ-18.3.Ш.01.103	Связь Швеллер 20П ГОСТ 8240 Ст 3 ГОСТ 535 L = 190 h14	ВАЭ-18.3.Ш.01.100	20	80 / шт	3.5	280	Швеллер 20 П ГОСТ 8240-97 / Ст 3 ГОСТ 14637-79	0000103	Швеллер	Швеллер 20 П 200	1 / 1	3.68 / 3.68	кг	ВАЭ-18.3.Ш.01.103 ТП / 61; 63;		
5		ВАЭ-18.3.Ш.01.103	Связь Швеллер 20П ГОСТ 8240 Ст 3 ГОСТ 535 L = 190 h14	ВАЭ-18.3.Ш.01.110	20	40 / шт	3.5	140	Швеллер 20 П ГОСТ 8240-97 / Ст 3 ГОСТ 14637-79	0000103	Швеллер	Швеллер 20 П 200	1 / 1	3.68 / 3.68	кг	ВАЭ-18.3.Ш.01.103 ТП / 61; 63;		

Составил СП | Составил норму | Маршрут составил | Особые отметки | Лист 1 | Листов 2
Подлинник исправл. | Контр. копию исправл.

ООО "Центр СПРУТ-Т", Москва, (499) 263-69-70, www.sprut.ru

Рис. 2. Спецификация заказа (изделия)

От блока «Планирование производства» поступают планы производства, сводные документы и разного рода потребности. От блока «Внутрицеховое управление» поступают отчеты производства, а от блока «Снабжение» - документы складов. На основе этих данных производится план-фактный анализ с учетом принятых критериев управления, который предоставляется руководству предприятия и служит для выпуска необходимых приказов и распоряжений.

Конструкторская подготовка производства

Вторым функциональным блоком на общей схеме рис. 1 является конструкторская подготовка производства, функциональная схема которой приведена на рис. 3.

Обязательность выполнения стадий и этапов разработки конструкторской документации устанавливается техническим заданием на разработку.

Техническое предложение – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможных решений изделий, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий и патентные исследования.

В результате разработки технического предложения формируется ведомость технического предложения и пояснительная записка.

Техническое предложение после согласования и утверждения в установленном порядке является основанием для разработки эскизного (технического) проекта.

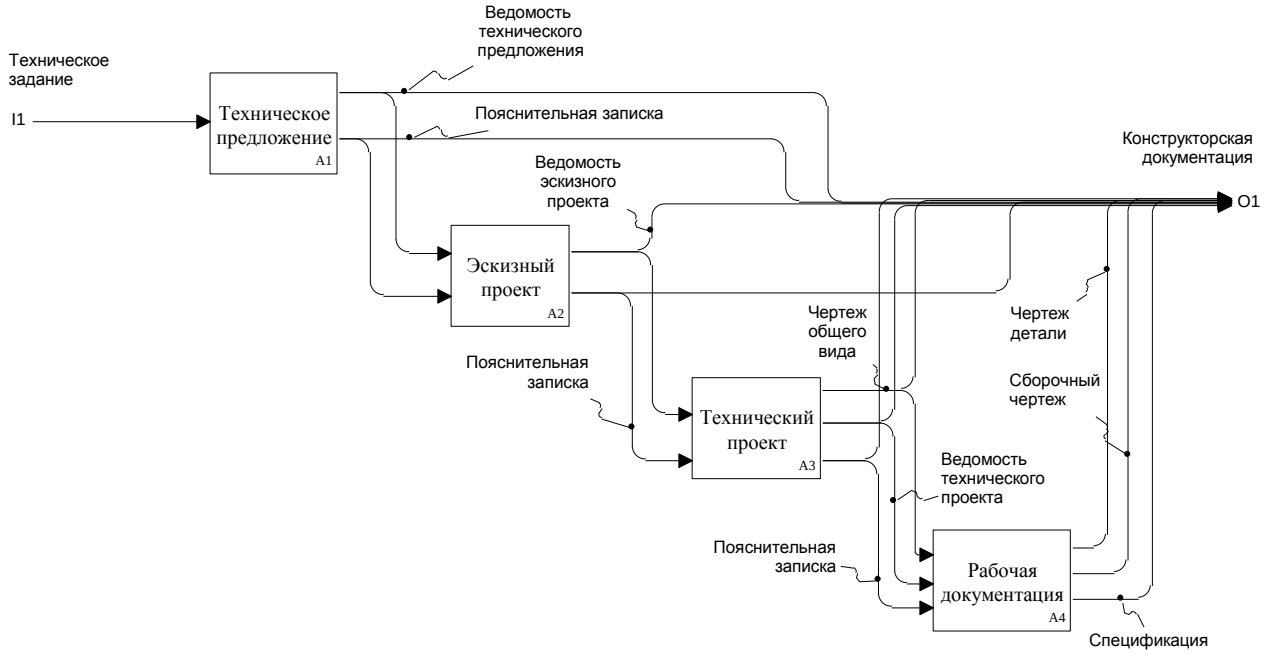


Рис. 3. Функциональная модель конструкторской подготовки производства

Эскизный проект – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия.

Эскизный проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документация.

Технический проект – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документация.

Технический проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки рабочей конструкторской документации.

В результате работы этого блока появляется конструкторская документация в соответствии с ЕСКД, в которую входит графическая документация в составе обязательных чертежей общего вида, сборочных чертежей и чертежей деталей, а также спецификации. Механизмом реализации этой функции являются компьютерные системы автоматизированного конструирования (CAD-системы). Современные CAD-системы обеспечивают выпуск не только документации, но и 3D модели деталей и сборочных единиц, необходимых для программирования обработки деталей на оборудовании с ЧПУ, а также изготовления деталей на 3D принтерах. Результаты автоматизированного конструирования представляются в виде, установленном международными стандартами. Геометрические модели изделий представляются в форме установленной стандартом IGES. В нем нет возможности задавать технические требования к изготовлению изделий, такие как точности размеров, отклонения формы и положения элементов, шероховатость поверхностей, твердость материала и т.п. Эта информация содержится в чертежах изделий, которые не могут быть подвергнуты автоматизированной обработке в компьютере. Вместе с тем без этих данных невозможно осуществлять автоматизированное проектирование технологических процессов.

Стандарт STEP задает полную информационную модель изделия на протяжении его жизненного цикла, а также способы реализации обмена данными, содержащимися в этой модели. Как полная модель изделия, так и способы обмена данными представлены в компьютерном виде, причем они не зависят от программных и аппаратных средств, применяемых участниками создания изделия.

CAD-системы работают совместно с системами автоматизации инженерных расчетов (CAE-системами) и системами управления проектной документацией (PDM-системами).

Средства CAE позволяют анализировать кинематику или динамику поведения проектируемого агрегата. С точки зрения этих систем каждый компонент изделия рассматривается как тело с сосредоточенной массой. В некоторых случаях средства CAE позволяют определить распределение напряжений или температур в механических компонентах, рассчитанных на физическую или тепловую нагрузку. Возможно также проведение вибрационного анализа компонента, на который будет воздействовать динамическая нагрузка. Перечисленные задачи решаются при помощи средств анализа методом конечных элементов.

PDM-системы реализуют PDM-технологию, которая предназначена для управления всеми данными об изделии и информационными процессами жизненного цикла изделия.

Данные об изделии представляют собой всю информацию о продукте в течение его ЖЦ в электронном виде. Они включают в себя состав и структуру изделия, геометрические данные, чертежи, технологические документы, планы проектирования и производства, спецификации, нормативные документы, программы для станков с ЧПУ, результаты анализа, корреспонденцию, сведения о партиях и отдельных экземплярах изделия и многое другое.

Информационные процессы являются процессами ЖЦ изделия, создающими или использующими данные о нем. Примером служит формальная процедура изменения изделия. Совокупность информационных процессов представляет собой документооборот, происходящий в течение ЖЦ изделия. Документооборот, управляемый PDM-системой, называется электронным документооборотом.

В функции PDM-системы входят:

Управление хранением данных и документов. Все данные и документы в PDM-системе хранятся в специальной подсистеме (хранилище данных), которая обеспечивает их целостность, организует доступ к ним в соответствии с правами доступа и осуществляет их поиск. Данные документы должны обладать электронной подписью.

Управление процессами. PDM-система отслеживает все операции пользователей с данными, в том числе следит за версиями. Кроме того, PDM-система управляет потоком работ и занимается протоколированием действий пользователей и изменений данных.

Управление составом изделия. PDM-система содержит информацию о составе изделия и его вариантах. Важной особенностью является наличие нескольких представлений состава изделия для различных предметных областей (конструкторский состав, технологический состав, маркетинговый состав и т.д.).

Классификация. PDM-система позволяет производить распределение изделий и документов в соответствии с различными классификаторами. Это может быть использовано при поиске продукта с нужными характеристиками с целью его повторного использования или для автоматизации присваивания обозначений компонентам изделия.

Основным преимуществом от использования PDM-технологии является сокращение времени разработки изделия, то есть выхода изделия на рынок, и повышение его качества.

Технологическая подготовка производства

Слабой стороной зарубежных систем управления жизненным циклом изделий машиностроения является отсутствие в них полномасштабных систем технологической подготовки производства с системами проектирования технологических процессов, обеспечивающих автоматизированное нормирование на базе отечественных нормативов. Такие системы должны

обеспечивать необходимые исходные данные для работы систем оперативного планирования и управления производством.

Далее описывается отечественная система СПРУТ-ТП, лишенная этих недостатков. Эта система работает совместно с системой оперативно-календарного планирования СПРУТ-ОКП.

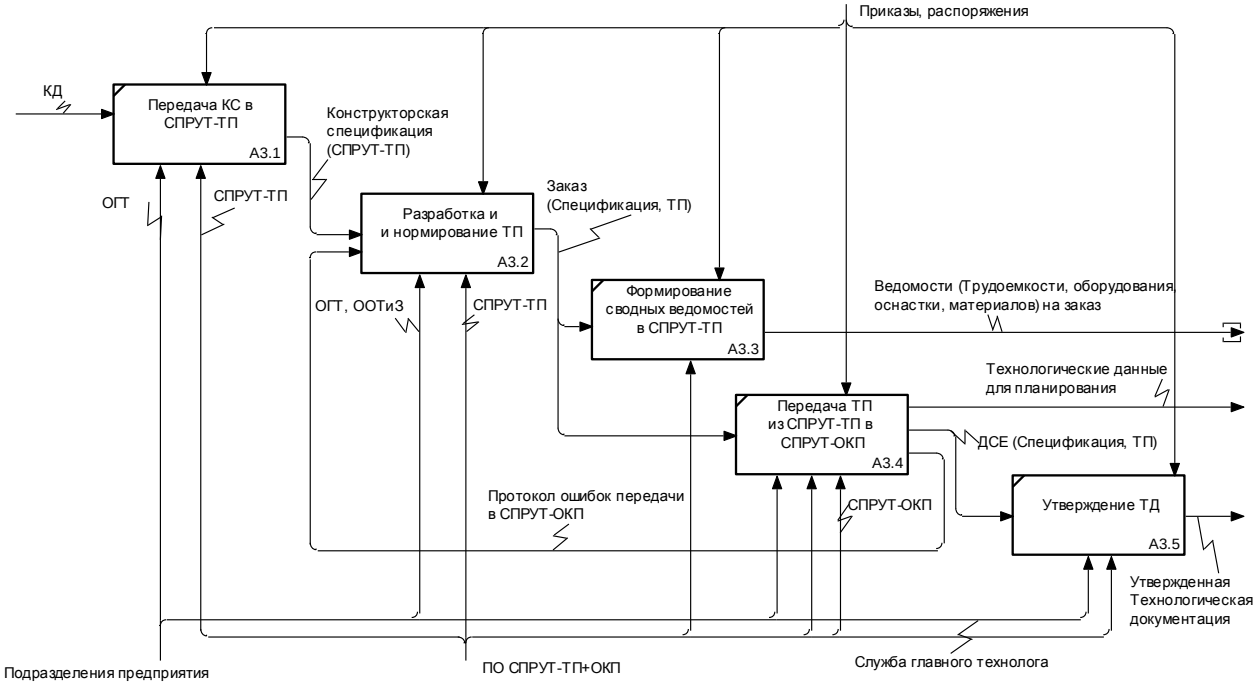


Рис. 4. Технологическая подготовка производства

Общая функциональная схема технологической подготовки представлена на рис. 4. Первый функциональный блок обеспечивает передачу конструкторской документации в СПРУТ-ТП. При этом разработаны программные средства, обеспечивающие выполнение этой операции применительно ко всем используемым в настоящее время систем автоматизированного конструирования. В качестве механизмов реализации этой функции используется отдел главного технолога (ОГТ), использующий СПРУТ-ТП.

Номенклатуру разрабатываемых и подлежащих нормированию технологических процессов определяют конструкторские спецификации. В работе участвует отдел организации труда и заработной платы (ООТиЗ).

Важнейшим функциональным блоком технологической подготовки производства является разработка и нормирование технологических процессов. Декомпозиция этого блока приведена на рис. 5.

Первым функциональным компонентом здесь является блок планирования и управления разработкой технологической документации. На вход его поступает конструкторская спецификация, а также протокол ошибок при передаче технологической документации в систему оперативно-календарного планирования.

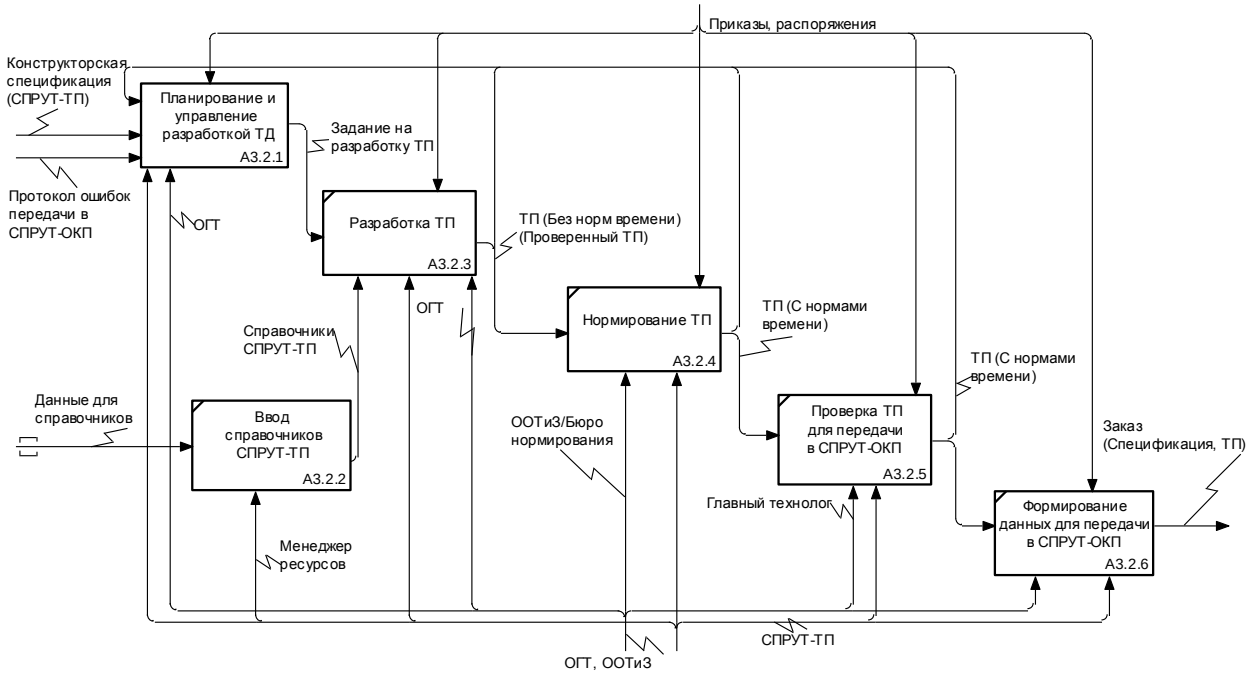


Рис. 5. Разработка и нормирование технологических процессов

Планирование осуществляется руководством отдела главного технолога с использованием СПРУТ-ТП, в результате чего формируется задание на разработку технологических процессов.

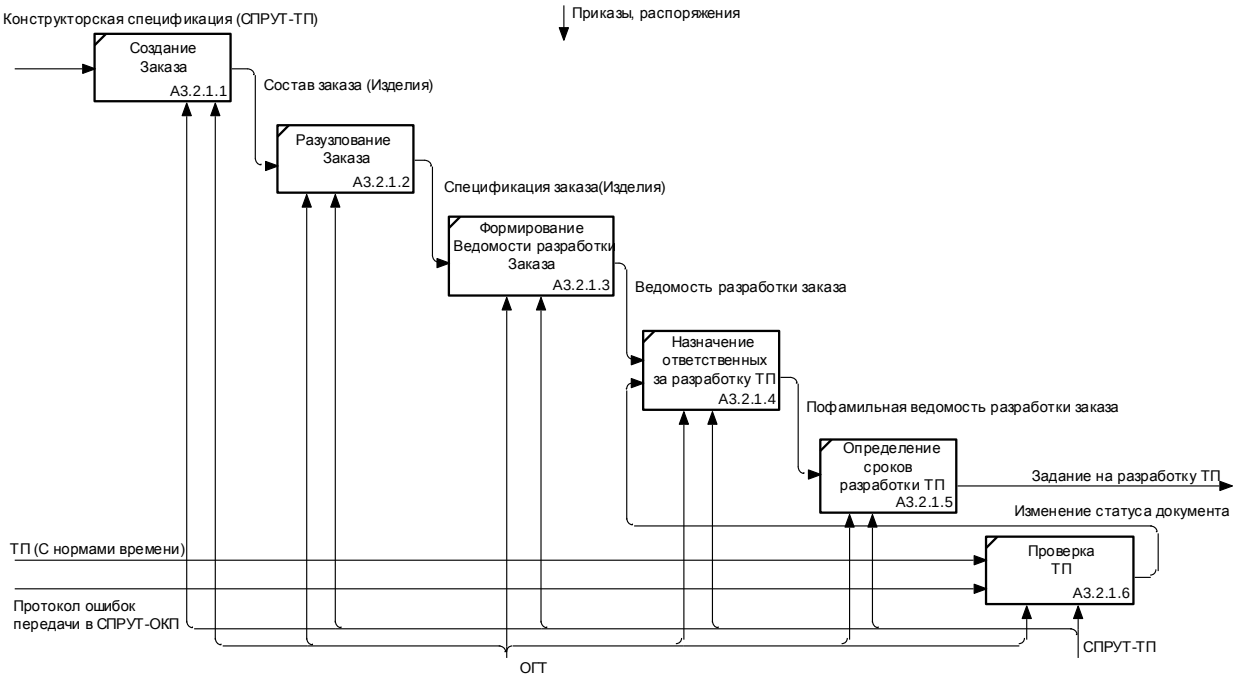


Рис. 6. Планирование и управление разработкой ТП

На рис. 6 приведена функциональная схема планирования и управления разработкой технологических процессов. Первоначальные действия здесь связаны с созданием заказа, разузлованием его и формированием ведомости разработки заказа. На основе этих документов производится назначение ответственных за разработку ТП и определение сроков разработки. Последним

действием здесь является проверка ТП с изменением при наличии ошибок статуса документов.

Разработка технологических процессов (рис. 4) ведется на основе справочников СПРУТ-ТП. Для их формирования и модификации используется менеджер ресурсов.

Проектирование технологических процессов в СПРУТ-ТП производится на двух уровнях: маршрутном и операционном. На рис. 7 приведен интерфейс системы при проектировании маршрутного технологического процесса. Проектирование ведется с помощью активного бланка маршрутной карты, соответствующей стандарту ЕСТД. Поля бланка соединены с базой данных ресурсов, что значительно облегчает процесс.

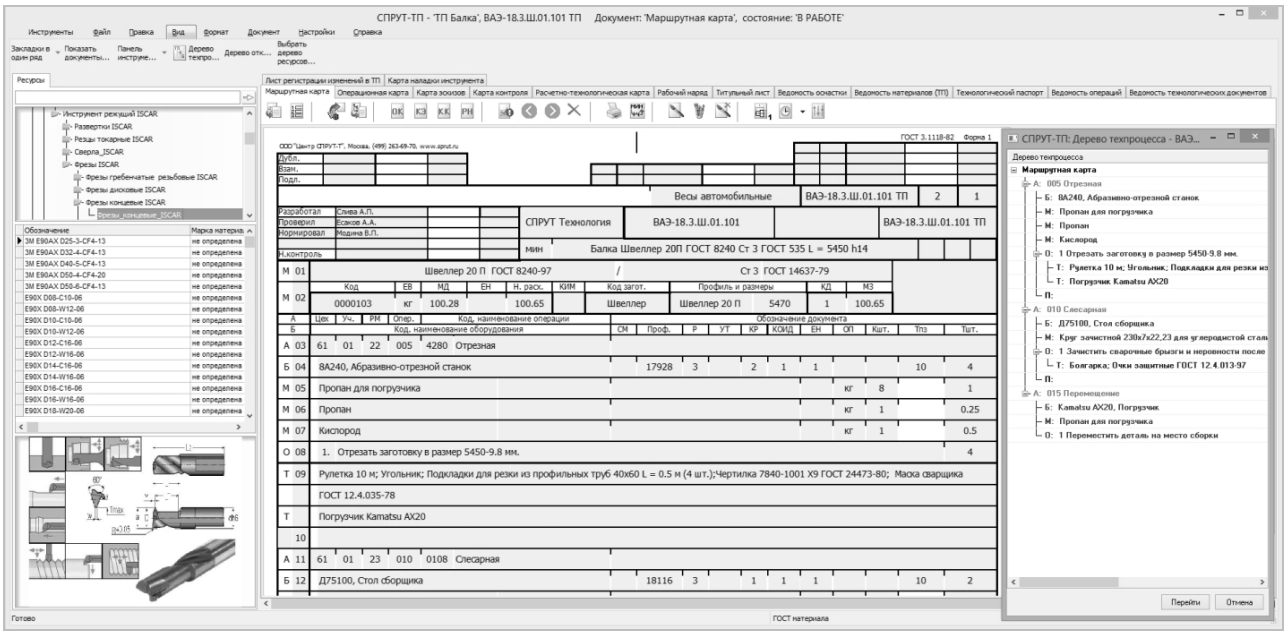


Рис. 7. Проектирование маршрутного технологического процесса в СПРУТ-ТП

Интерфейс системы при проектировании и нормировании операций представлен на рис. 8. Здесь также применяется принцип активного документа, но с использованием бланков технологических операций ЕСТД. Для выбора вида проектируемой операции используются наглядные иконки.

В результате формируются технологические процессы и спецификации на основе которых производится формирование сводных технологических ведомостей (трудоемкости, оборудования, оснастки и материалов) на данный заказ. В качестве примера сводных ведомостей на рис. 9 приведен пример сводной ведомости трудоемкости на заказ.

Спроектированные и отнормированные в СПРУТ-ТП технологические процессы передаются в систему оперативно-календарного планирования СПРУТ-ОКП. При формировании данных для передачи в СПРУТ-ОКП проверяется их корректность и протокол ошибок возвращается на вход блока разработки и нормирования технологических процессов.

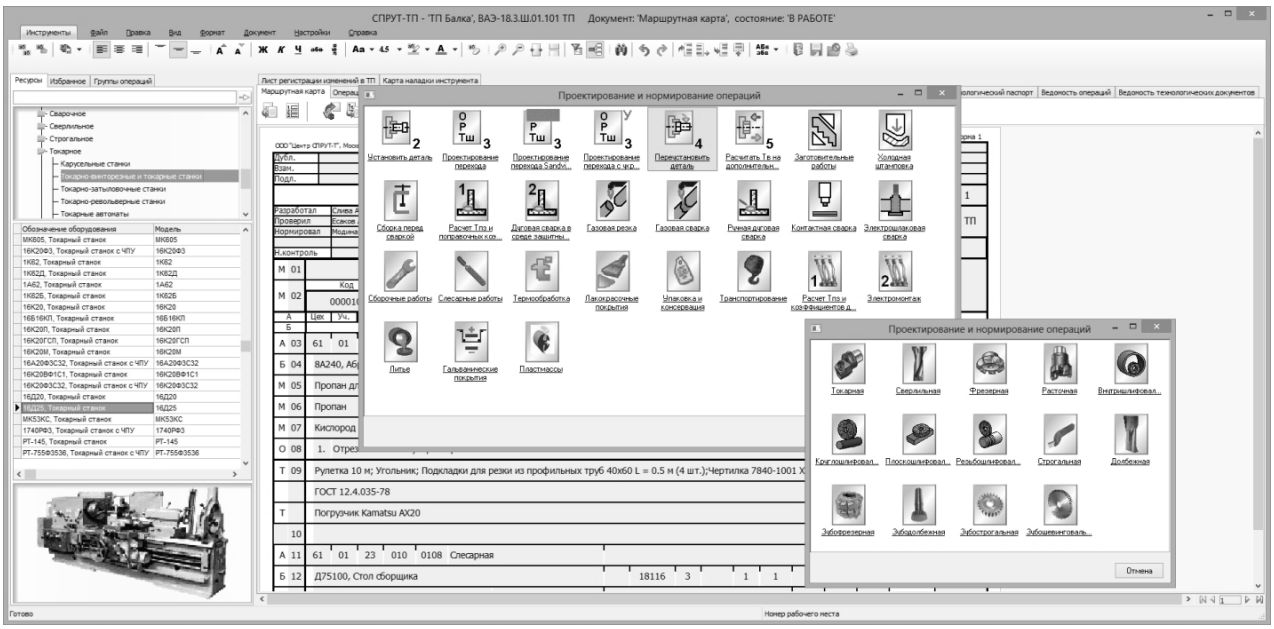


Рис. 8. Проектирование операционного технологического процесса в СПРУТ-ТП

Сводная ведомость трудоемкости

ВАЭ-18.3.Ш.01.100 Полуплатформа									Ч	Суммарное Тпз 3.750	Суммарное Тшт 103.060	
Р	Обозначение ДСЕ, ТП				Наименование ДСЕ, ТП		Кол.	Тпз на 1шт.	Тшт на 1шт.	Тпз	Тшт	Примечания
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Профессия	Разряд	Тпз на 1шт.	Тшт на 1шт.	Тпз	Тшт	Примечания
С 01	ВАЭ-18.3.Ш.01.100				Полуплатформа		4	0.750	7.750	0.750	31.000	
02												
С 03	ВАЭ-18.3.Ш.01.110				Полуплатформа		2	0.750	7.750	0.750	15.500	
04												
С 05	ВАЭ-18.3.Ш.01.101				Балка Швеллер 20П ГОСТ 8240 Ст 3 ГОСТ 535 L = 5450		32	0.4167	0.7775	0.4167	24.880	
06					h14							
07												
С 08	ВАЭ-18.3.Ш.01.103				Связь Швеллер 20П ГОСТ 8240 Ст 3 ГОСТ 535 L = 190		120	0.4167	0.1125	0.4167	13.500	
09					h14							
10												
С 11	ВАЭ-18.3.Ш.01.106				Настил Лист чечевица 4.0 ГОСТ 8568 БСт3сп 5490х1250		4	0.1667	0.125	0.1667	0.500	
12												
С 13	ВАЭ-9.2.Ш.01.105				Перекладина правая		6	0.500	0.875	0.500	5.250	
14												
С 15	ВАЭ-9.2.Ш.01.107				Пластина монтажная		24	0.3333	0.1292	0.3333	3.100	
16												

Рис. 9. Сводная ведомость трудоемкости в СПРУТ-ТП

Разработанная технологическая документация подлежит утверждению в службе главного технолога.

Методы искусственного интеллекта в технологической подготовке производства

Отличительной особенностью системы СПРУТ-ТП является широкое использование в ней методов искусственного интеллекта (ИИ). Одно из наилучших определений ИИ приведено в работе [3] и звучит так:

«*Искусственный интеллект* – это одно из направлений информатики, целью которого является разработка аппаратно-программных средств, позволяющих пользователю-непрограммисту ставить и решать свои, традиционно считающиеся интеллектуальными задачи, общаясь с ЭВМ на ограниченном подмножестве естественного языка».

Во всех видах проектирования имеется две разновидности синтеза: структурный и параметрический. Как следует из рис. 5 при проектировании технологических процессов структурный синтез производится при разработке ТП, а параметрический при нормировании.

В данном случае структурный синтез заключается в формировании маршрутного технологического процесса из операций с использованием баз знаний. Язык представления таких знаний должен быть максимально упрощен и доступен для непрограммирующих пользователей. Для технологов наиболее естественным является заполнение стандартной технологической документации, например, маршрутных карт. По этой причине в системе СПРУТ ТП [4] для представления знаний о структуре операций технологических процессов использованы модернизированные стандартные маршрутные карты. В таких картах технологический процесс описывается с использованием стандартных строк типа А и типа Б. Строки типа А используются для задания параметров операций, а строки типа Б – для описания используемого оборудования (рис. 10). Чтобы получить возможность автоматического формирования структуры процессов к числу стандартных технологических строк типа А и типа Б необходимо добавить строки, позволяющие задавать условия вхождения операций в итоговый технологический процесс. Эти условия должны позволять описывать логические связки типа исключающего ИЛИ.

Для задания логических связок в форму маршрутной карты введены строки типа «Условие» и «Конец условия». Эти строки в совокупности с заключенными между ними стандартными технологическими строками представляют собой аналог правила-продукции. Весь массив такой информации может рассматриваться как своеобразный аналог базы знаний продукционного типа с упорядочением правил во времени.

Содержание рис. 10 позволяет в зависимости от значения переменной #Zagot# выбирать те или иные заготовительные операции, которые заносятся в итоговый документ. Если эта переменная имеет значение «ЛИТЬЕ», то в маршрутный техпроцесс включается операция литья. В случае значения «ШТАМПОВКА» в процесс включаются операции пило-отрезная и штамповка. Если заготовкой является «КРУГ», то должна выполняться фрезерно-отрезная операция.

Вслед за этими операциями безусловно следуют отжиг и токарная с ЧПУ.

Основным направлением параметрического синтеза технологических процессов является нормирование, главный компонент которого – определение для каждой операции норм штучного и подготовительно-заключительного времени.

Методики определения норм содержатся в нормативных справочниках. Для превращения методик и разного рода справочников в компьютерные программы разработана система экспертного программирования СПРУТ-ЭксПро. С помощью этой системы прикладной специалист, не владеющий программированием, генерирует программные коды в форме продукционных баз знаний.

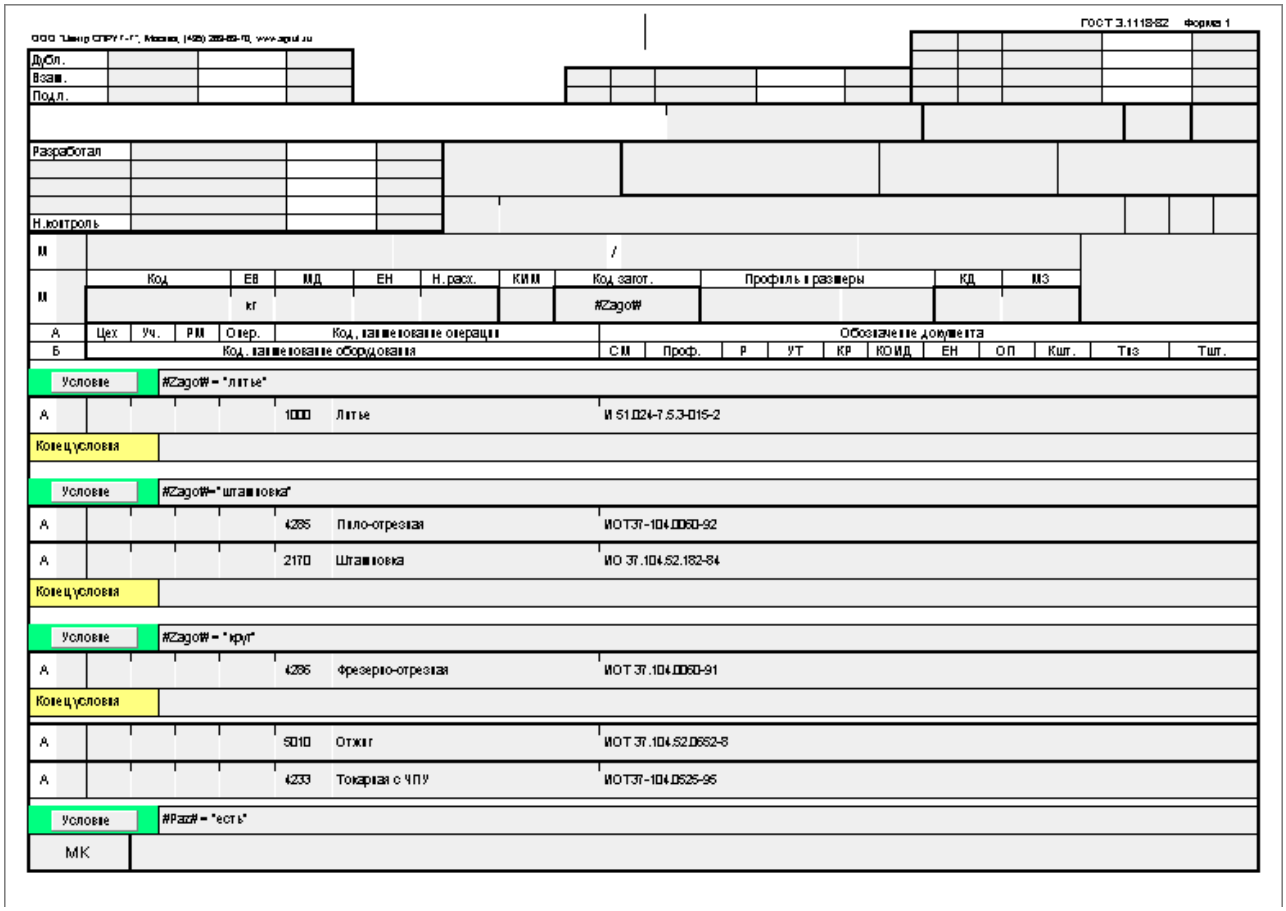


Рис. 10. Средство формирования баз знаний структурного синтеза процессов в СПРУТ-ТП

На рис. 11 представлен процесс создания баз знаний. На входе мы имеем нормативные источники в форме таблиц, формул и чертежей. Используя эти источники производится создание словаря баз знаний. В тех случаях, когда слово имеет перечисляемый набор значений, для него составляются ассоциативные списки, содержащие этот набор.

Основным компонентом баз знаний в технологии СПРУТ-ЭксПро являются модули инженерных знаний (МИЗ). Модули инженерных знаний могут иметь предусловия, при выполнении которых они осуществляют преобразование исходных данных в выходные. В качестве механизмов таких преобразований используются формулы, таблицы, параметризованные графические модели и т.д. Каждый модуль при трансляции автоматически преобразуется в программные коды.

Для решения сложных задач из модулей формируются методы, при трансляции которых автоматически генерируются алгоритмы и программные

коды их реализации. Таким образом, пользователь, описывая свою задачу на языке «деловой прозы», понятной для человека и для компьютера, полностью освобождается от проблем программирования.

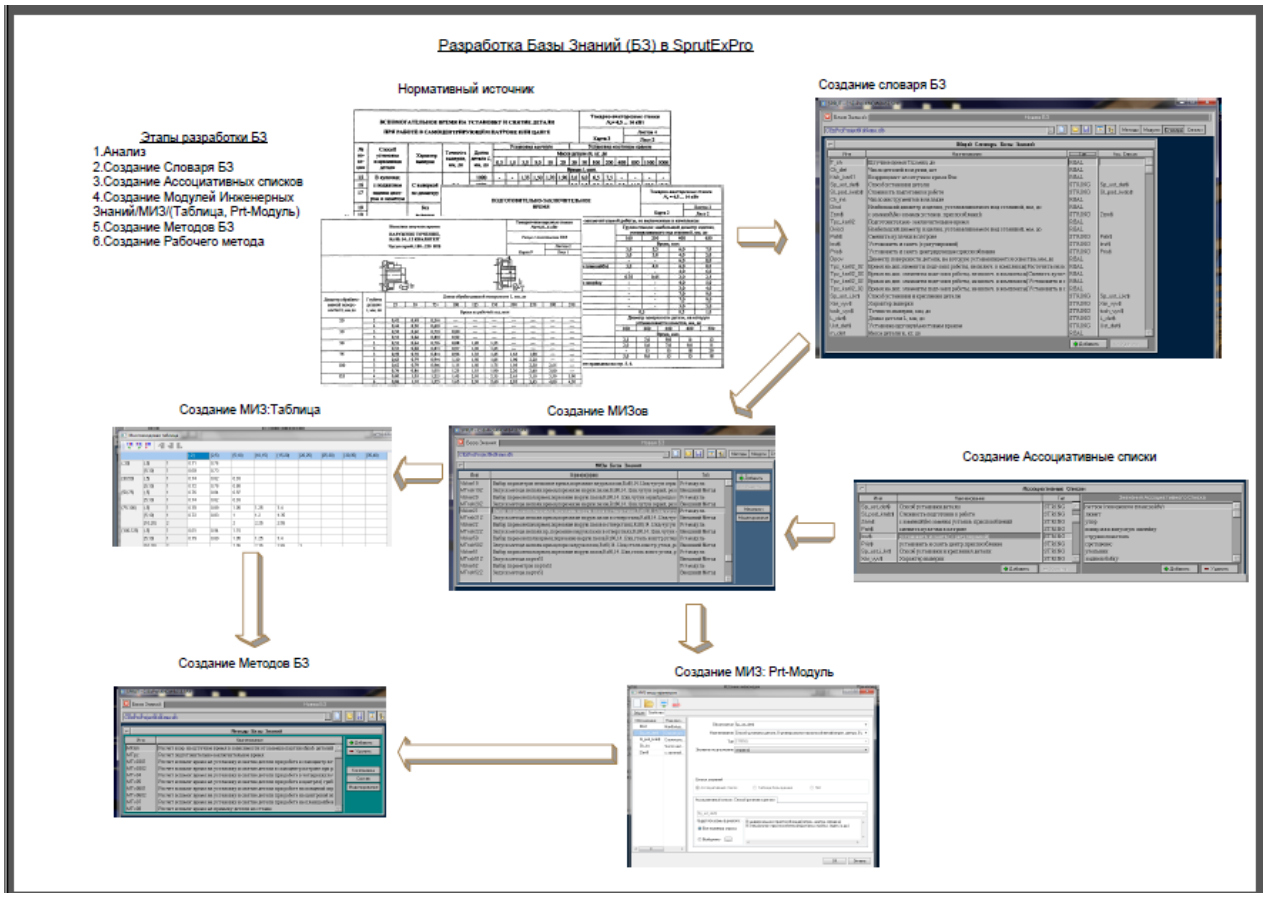


Рис. 11. Средство формирования баз знаний параметрического синтеза процессов в СПРУТ-ТП

Планирование производства

Как следует из общей функциональной модели работы предприятия (рис. 1) за технологической подготовкой следует блок планирования производства. Это планирование производится на двух уровнях: на уровне предприятия и на цеховом уровне. На уровне предприятия формируется план выпуска на год, квартал, месяц. На этой основе формируется планы-графики цехов с учетом межцеховых переходов.

Формирование общего плана производства (рис. 12) складывается из двух этапов: разработки предварительного плана (рис. 13) и его оценки по загрузке оборудования (рис. 14). Эти и последующие функции реализуются с помощью системы СПРУТ-ОКП. В результате вырабатывается согласованный план, поступающий на утверждение.

Формирование производственной программы складывается из следующих этапов. На основе заказа и с учетом технологических данных для планирования производится выбор методики планирования. На основе этого планируются сроки исполнения заказа. С учетом намеченных сроков производится моделирование производства, формируется предварительный

план производства, который оценивается по загрузке оборудования и при необходимости перерабатывается.

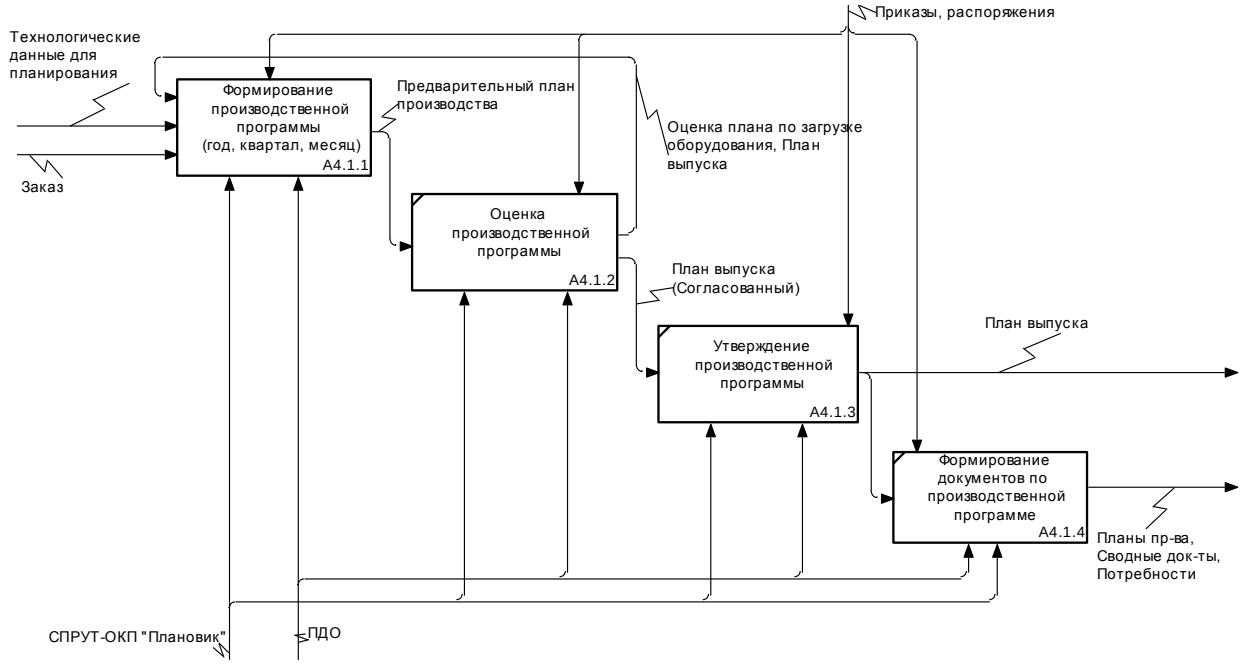


Рис. 12. Формирование общего плана производства

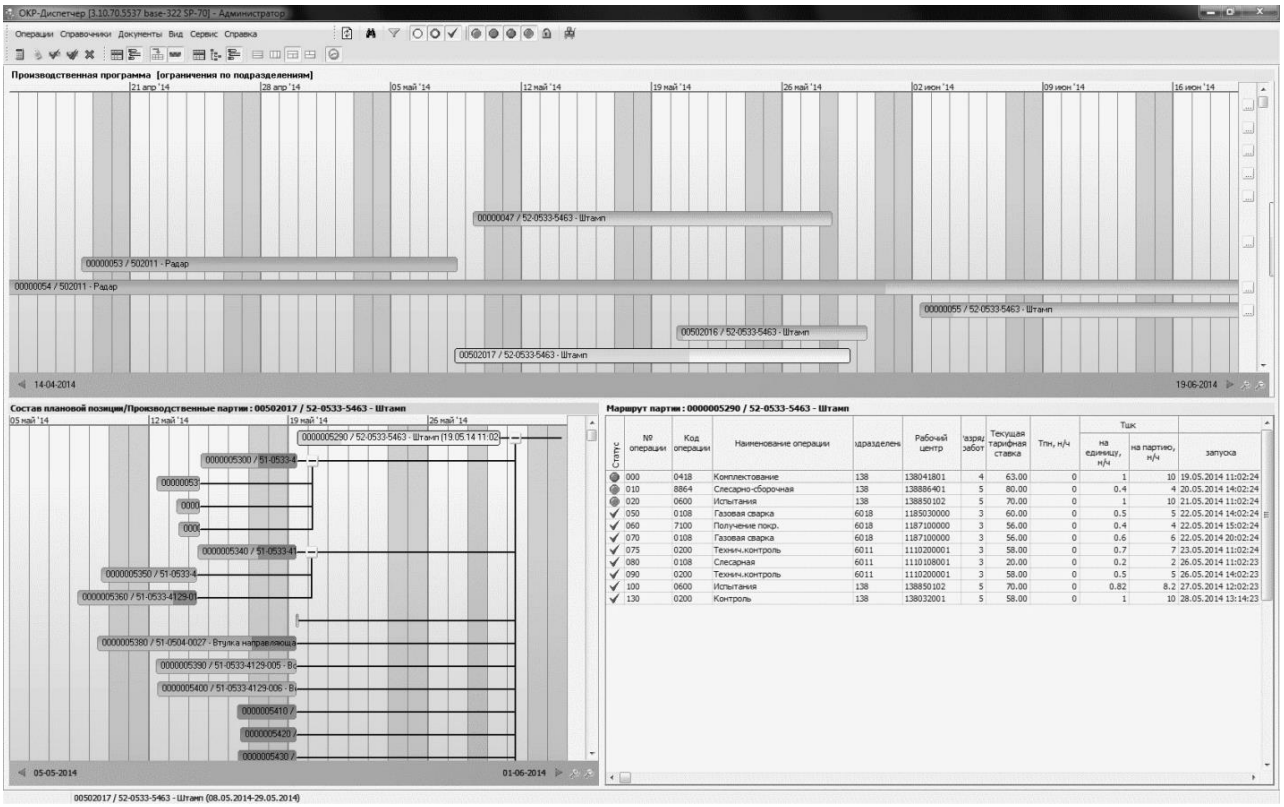


Рис. 13. Производственная программа в виде диаграммы Ганта (СПРУТ-ОКП)

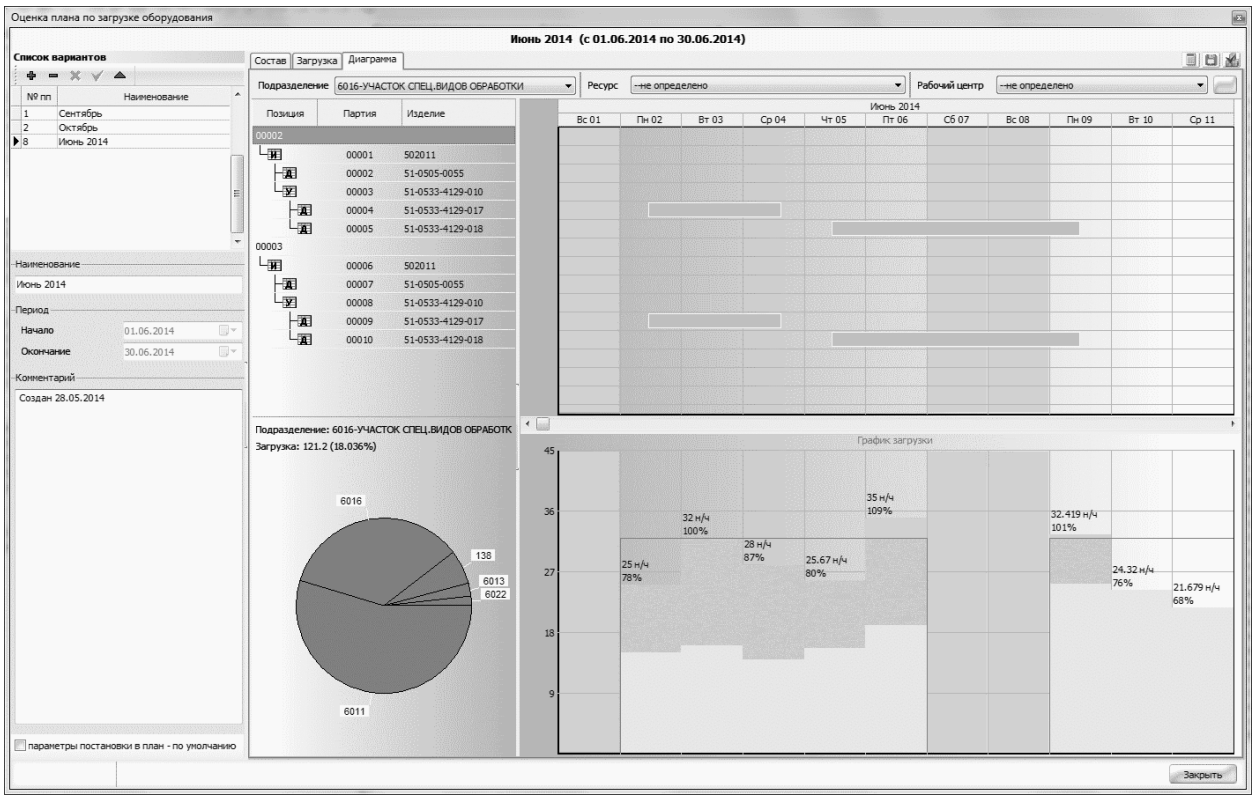


Рис. 14. Оценка плана по загрузке оборудования (СПРУТ-ОКП)

Описанные выше функциональные блоки входят в состав подсистемы СПРУТ-ОКП «Плановик».

На основе утвержденного в итоге плана выпуска производится формирование конкретных планов производства, сводных документов и потребностей ресурсов для реализации плана.

На основе принятых планов осуществляется внутрицеховое управление, функциональная схема которого представлена на рис. 15.

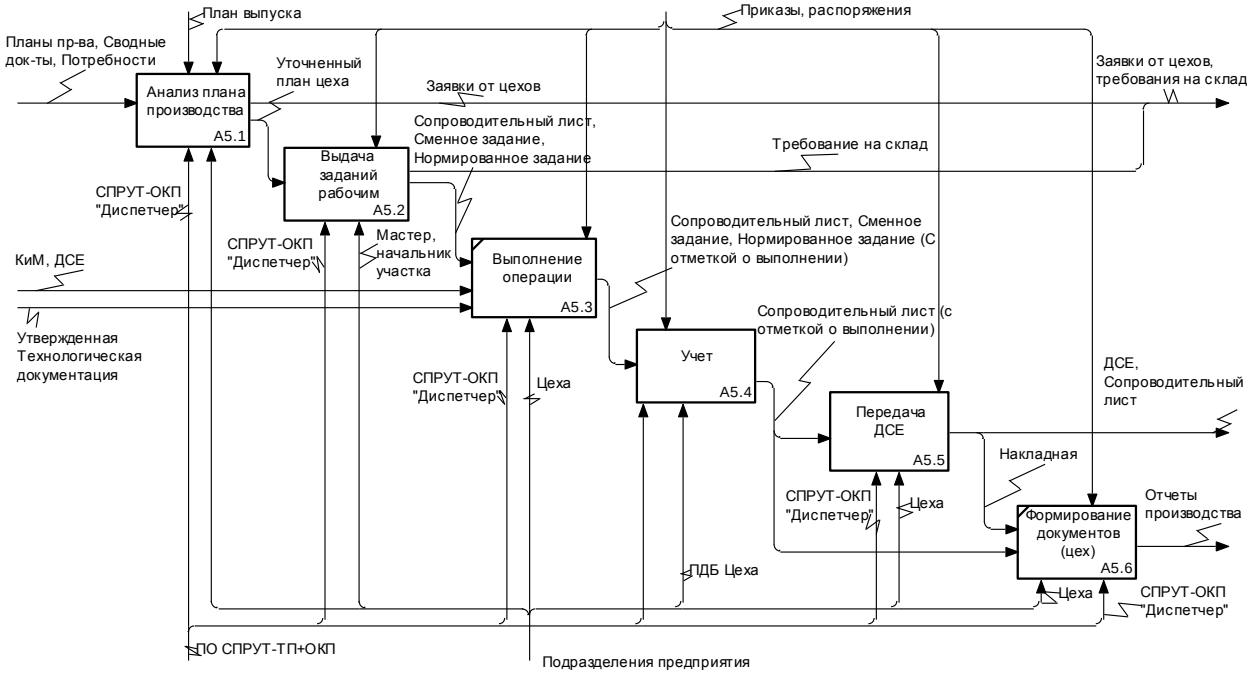


Рис. 15. Внутрицеховое управление

Первым функциональным блоком внутрицехового управления является анализ плана производства с разработкой уточненного плана цеха и формированием заявок на необходимые ресурсы и требований на склады.

Анализ плана производства включает анализ плана по загрузке оборудования (рис. 14), анализ резерва времени по плану и анализ обеспеченности плана. На основе этого создается уточненный план цеха, в соответствии с которым производится выдача заданий рабочим и выполнение операций.

Далее следует учет, который включает учет выполненных работ по сменному заданию, учет выполненных работ на одного исполнителя и на группу исполнителей.

Следующий функциональный блок обеспечивает формирование накладных по передаче деталей и сборочных единиц на центральный склад, в сборочный цех и для межцеховой передачи.

Заключительный блок генерирует отчеты производства на цеховом уровне.

Все перечисленные функциональные блоки входят в состав подсистемы СПРУТ-ОКП «Диспетчер».

Информационная логистика

Достоинством описываемой системы оперативно-календарного планирования является включение в нее подсистемы информационной логистики.

Информационная логистика – это часть логистики, которая является связующим звеном между снабжением, производством и сбытом предприятия и занимается организацией потока данных, который сопровождает материальный поток в процессе его перемещения.

Основная задача информационной логистики – доставка информации к и от системы управления предприятием, при этом каждый уровень иерархии должен получать только необходимую ему информацию в требуемые сроки. Высший уровень руководства должен получать от информационной логистики информацию для выработки стратегии и политики.

Среднему уровню руководства необходима управленческая информация для тактического планирования и принятия решений.

На нижнем уровне информационная логистика должна обеспечивать информацию для оперативного планирования и контроля.

В ходе протекающих в логистической системе процессов информационная логистика должна реализовывать:

1) сбор информации в местах ее возникновения;
2) анализ информации и ее преобразование;
3) накопление информации и ее хранение.

Информационная логистика должна обеспечивать передачу информации, фильтрацию информационного потока, выполнение элементарно-информационных преобразований. В целом информационная логистика должна управлять информационным потоком.

Снабжение производства

Информационная логистика входит в состав одного из последних функциональных блоков модели работы предприятия на рис. 1 – в блок «Снабжение», который реализован в подсистеме СПРУТ-ОКП «Склад». Декомпозиция этого блока приведена на рис. 16.

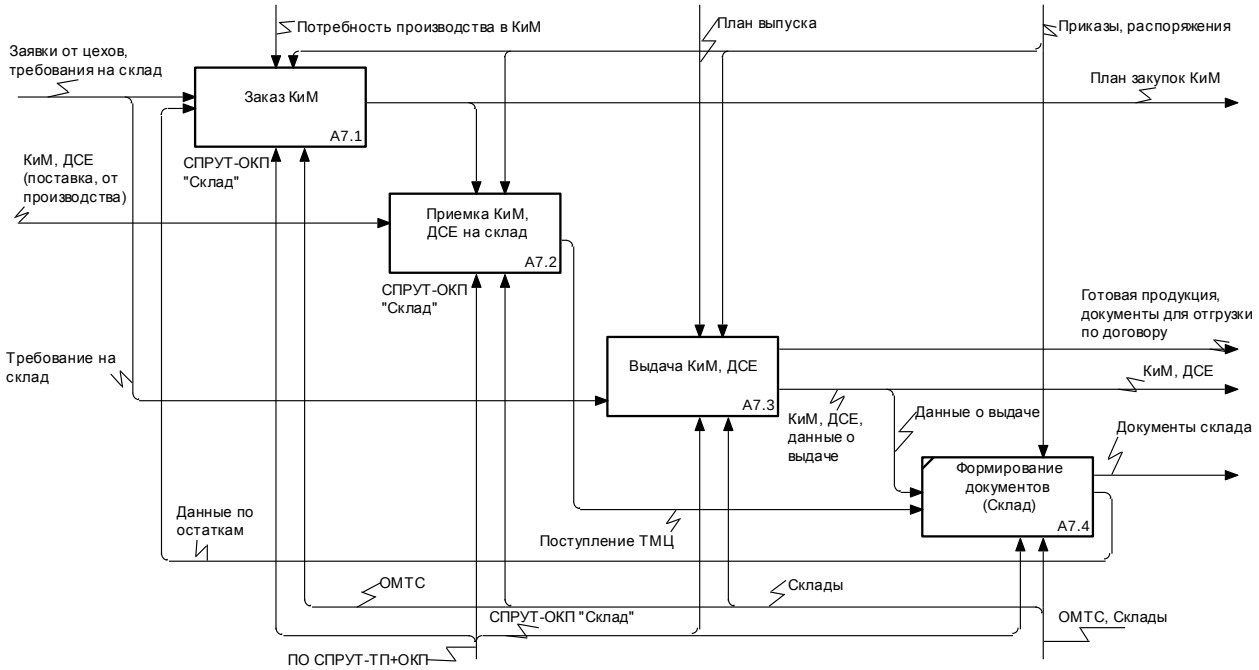


Рис. 16. Функциональная модель подсистемы СПРУТ-ОКП «Склад»

Первый функциональный модуль этой подсистемы обеспечивает заказ комплектующих и материалов (КиМ) и генерирует план закупок КиМ. Информация о поступающих комплектующих и материалах, а также обработанных деталях и сборочных единицах (ДСЕ) обрабатывается в блоке приемки этих товарно-материальных ценностей (ТМЦ).

В соответствии с требованиями, поступающими на склад, производится их выдача. В итоге производится общее формирование документов склада.

Экономика производства

Система СПРУТ-ОКП включает блок «Экономика» (рис. 1). В этом блоке производится калькуляция по статьям затрат. На основе отчетов, поступающих с производства, формируются данные о браке деталей и сборочных единиц с указанием их количества, стоимости и причин брака. Эти отчеты используются для формирования нарядов на оплату.

Все перечисленные данные необходимы для формирования экономических отчетов.

Экономическая информация позволяет системе СПРУТ-ОКП производить план-фактный анализ производства. Этот анализ выполняется в подсистеме «Руководитель».

Анализ включает формирование документов для его выполнения, собственно план-фактный анализ и на основе ключевых показателей

эффективности принятие управленческих решений в форме приказов и распоряжений.

Выводы

Разработан комплекс взаимосвязанных систем технологической подготовки и оперативного управления машиностроительным производством с учетом отечественных стандартов и методов управления. Обеспечена интеграция упомянутых систем с российскими системами конструкторской подготовки производства. Таким образом, создана отечественная система управления жизненным циклом изделий машиностроения, которая успешно внедряется на российских предприятиях.

Литература

1. Красковский Д. М. Обзор состояния рынка систем PLM/TDM/PDM/Workflow // САПР и графика. – 2004. – №12. С. 34–37.

2. Евгенев Г. Б. Основы автоматизации технологических процессов и производств: учебное пособие: в 2 т. / [Г. Б. Евгенев и др.]; под ред. Г. Б. Евгенева. – М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015.

3. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

4. Евгенев Г. Б., Кузьмин Б. В. Метод генерации баз знаний структурного синтеза маршрутных технологических процессов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. №5. С. 60–68.

References

1. Kraskovsky D. M. Obzor sostoyaniya ryinka sistem PLM/TDM/PDM/Workflow [Overview of the market of systems PLM/TDM/PDM/Workflow]. *SAPR and graphic*, 2004, no. 12, pp. 34–37 (in Russian).

2. Evgenev G. B. *Osnovyi avtomatizatsii tehnologicheskih protsessov i proizvodstv* [Fundamentals of automation of technological processes and production]. Moscow, 2015. (in Russian).

3. Gavrilova T. A., Khoroshevsky V. F. *Bazyi znaniy intellektualnyih sistem* [Knowledge Databases for Intelligent Systems]. Saint Petersburg, Piter, 2000. 384 p. (in Russian).

4. Evgenev G. B., Kuzmin B. V. Metod generatsii baz znaniy strukturnogo sinteza marshrutnyih tehnologicheskih protsessov [The method of generating knowledge bases of structural synthesis route process] *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Mashinostroenie*, 2013, no. 5, pp. 60–68. (in Russian).

Информация об авторах

Евгенев Георгий Борисович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры компьютерных систем управления производством МГТУ им. Н. Э. Баумана. Область научных интересов: интеллектуальные системы

управления жизненным циклом изделий машиностроения. Тел.: +7 499 263 69 70. E–mail: g.evgenev@mail.ru

Кузьмин Борис Владимирович – генеральный директор компании «Центр СПРУТ-Т». Компания «Центр СПРУТ-Т». Область научных интересов: системы управления жизненным циклом изделий машиностроения. Тел.: +7 495 181 00 13. E–mail: st@sprut.ru

Рубахина Вера Игоревна – ведущий специалист компании «Центр СПРУТ-Т». Компания «Центр СПРУТ-Т». Область научных интересов: системы оперативно-календарного управления производством. Тел.: +7 495 181 00 13. E–mail: st@sprut.ru

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

Methods and Tools for Product Lifecycle Management in Mechanical Engineering

G. B. Evgenev, B. V. Kuzmin, V. I. Rubakhina

Statement of the Problem. *The task of ensuring the competitiveness of Russian mechanical engineering are relevant to the present.Russian production requires modern Russian systems lifecycle management products Such systems should be based on accepted country standards and principles of production management.* ***The aim*** *is to build a functional model of organizational and technical system that reflects all the stages of creating a product in discrete manufacturing.* ***Methods****. We used methods based on the analysis of documents and mechanisms for its implementation.* ***Novelty****. Russian standards into account when developing conceptual model of life-cycle management of products in process engineering.* ***Results****. Production efficiency at Russian enterprises have grown in the application of our management model.* ***Practical significance****. The presented solution can be implemented on all machine-building enterprises with custom-made production. The described methods allow to predict and adequately to make operational and strategic management decisions, reduce operating costs of production.*

Key words: life cycle management of products, design processes, operations management.

Information about Authors

Georgy Borisovich Evgenev – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor, Department of Computer Control Systems production BMSTU. Research interests: intelligent control system lifecycle engineering. Tel .: +7 499 263 69 70. E-mail: g.evgenev@mail.ru

Boris Vladimirovich Kuzmin – General Director. Center of SPRUT-T. Research interests: management lifecycle engineering. Tel.: +7 495 181 00 13. E-mail: st@sprut.ru

Vera Igorevna Rubakhina – Leading specialist. Center of SPRUT-T. Research interests: management lifecycle engineering. Tel.: +7 495 181 00 13. E-mail: st@sprut.ru

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

УДК 004.724.4

Имитационные модели системы массового обслуживания типа *Pa*/*M*/1, H_2/*M*/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой

Ушанев К. В.

Постановка задачи: *в настоящее время рост доли мультисервисного трафика в сетях связи, а также необходимость обеспечения требований потребителей услуг связи, делают актуальными вопросы обеспечения качества обслуживания трафика сложной структуры в узлах сетей связи.* ***Целью работы*** *является оценка времени задержки пакетов в узлах сети связи при обслуживании трафика сложной структуры на основе разработанной имитационной модели. В качестве критерия сложности структуры трафика используется коэффициент вариации интервала времени между очередными пакетами. В качестве модели трафика сложной структуры используются потоки, имеющие Парето- и гиперэкспоненциальное распределения в широком диапазоне изменения их входных параметров и уровня загрузки узлового оборудования сети связи.* ***Используемые методы:*** *модель узлового оборудования формализована на основе научно-методического аппарата теории массового обслуживания и реализована в программной среде имитационного моделирования GPSS World.* ***Новизной*** *данной работы являются количественные оценки качества обслуживания трафика сложной структуры по показателю времени задержки при обслуживании в узловом оборудовании сети связи, полученные в результате проведенного исследования разработанных имитационных моделей обслуживания трафика с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями в широком диапазоне изменения их входных параметров.* ***Результат:*** *на основе данных, полученных при исследовании имитационных моделей обслуживания трафика типа Pa/M/1, H_2/M/1, было определено, что своевременность обслуживания трафика со сложной структурой в узлах связи по показателю времени задержки существенно зависит от загрузки узлового оборудования. При исследовании имитационной модели обслуживания трафика с распределением Парето Pa/M/1 было выявлено, что значение коэффициента вариации интервала времени между очередными заявками такого трафика имеет экспоненциальную зависимость от значений параметра формы распределения Парето. Также при заданном диапазоне значений параметров потока с распределением Парето, определяющих загрузку устройства обслуживания (при фиксированном времени обслуживания), характерны три области, в которых время задержки заявок потока с распределением Парето имеет значения: больше, чем время задержки для потока с экспоненциальным распределением; меньше, чем время задержки для потока с экспоненциальным распределением; практически равные значениям времени задержки для потока с экспоненциальным распределением. Определены предельные значения коэффициента масштаба для потока с распределением Парето, которые приводят к перегрузке устройства обслуживания. При исследовании имитационной модели H_2/M/1 получена количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания потока с гиперэкспоненциальным распределением относительно потоков с распределением Парето и с экспоненциальным распределением. Получены оценки уровня снижения своевременности обслуживания по показателю времени задержки в зависимости от уровня загрузки устройства обслуживания и от значения коэффициента вариации. На основе полученных данных имитационного моделирования сделан вывод о том, что своевременность обслуживания в узлах сетей связи трафика сложной структуры с распределением Парето по показателю времени задержки снижается. При повышении загрузки узлового оборудования сети связи до 0,9 и росте значения коэффициента вариации интервала времени между пакетами до 23,6 своевременность обслуживания снижается до 539 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика. Для гиперэкспоненциального распределения при тех же значениях загрузки сети связи и коэффициента вариации своевременность обслуживания снижается до 8000 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика.* ***Практическая значимость:*** *разработанная имитационная модель и полученные при проведении моделирования результаты позволяют обосновать перспективные требования к быстродействию узлового оборудования сетей связи, которые в дальнейшем позволят обеспечить своевременность обслуживания трафика со сложной структурой.*

Ключевые слова: *сеть связи, имитационное моделирование, качество обслуживания, коэффициент Херста, коэффициент вариации, свойство самоподобия, свойство фрактальности.*

Актуальность

В настоящее время в связи с развитием высокоскоростных сетей связи (СС) растет доля циркулирующего в них мультисервисного трафика (передача данных реального времени, речи, видео). За счет этого повышаются требования к пропускной способности СС и к качеству обслуживания QoS (Quality of service) мультисервисного трафика.

Анализ работ [1-6] показал, что одним из свойств мультисервисного трафика является его структурная сложность, оказывающая влияние на своевременность обслуживания трафика в узлах СС. Под трафиком со сложной структурой будем понимать трафик, у которого коэффициент вариации c_τ интервала времени между очередными пакетами имеет значения $c_\tau>1$. Коэффициент вариации c_τ – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность, и вычисляемая в соответствии с выражением [7]:

$$c_\tau=\sigma_\tau/m_\tau, \qquad (1)$$

где τ – интервал времени между очередными пакетами трафика; m_τ – математическое ожидание (МОЖ) значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика; σ_τ – среднее квадратическое отклонение (СКО) значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика.

Мультисервисному трафику, циркулирующему в СС, присущи нестационарные свойства, которые моделируются стационарными потоками со сложной структурой, обладающими свойством самоподобия.

В работах [1, 8, 9] указывается, что свойство самоподобия оказывает влияние на своевременность обработки трафика, циркулирующего в реальных сетях связи. При этом показателем наличия данного свойства у трафика является коэффициент Херста H, принимающий значения в диапазоне $H\in(0{,}5;\ 1]$.

Широкое применение в качестве модели реального трафика для расчетов показателей качества его обслуживания получил поток с пуассоновским распределением, который не учитывает свойство самоподобия. Таким образом, для получения более точных оценок показателей качества обслуживания реального трафика, циркулирующего в реальных СС, необходима разработка адекватных моделей, которые бы учитывали свойство самоподобия.

Анализ работ [9-12, 16] показал, что в качестве модели реального трафика, позволяющей более адекватно описать свойство самоподобия, используется поток с Парето-распределением значения интервала времени между поступлением очередных заявок.

Анализ исследований [9-11] показал, что при использовании потока с распределением Парето в качестве модели трафика со сложной структурой ($c_\tau>1$), наиболее актуален диапазон значений параметра формы

$\alpha \epsilon (1; 2]$. Данные значения параметра α распределения Парето позволяют описать сложную структуру трафика за счет формирования больших значений СКО $\sigma_{\tau\,par}$ интервала времени между моментами поступления очередных заявок потока.

Функция распределения Парето определяется выражением

$$F(\tau_{par}) = 1 - \left(\frac{k}{\tau_{par}}\right)^{\alpha}, k > 0, \alpha > 0, \tau_{par} > k, \quad (2)$$

где τ_{par} – интервал времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето; k – коэффициент масштаба; α – параметр формы распределения Парето.

Значения статистических характеристик МОЖ $m^{ан}_{\tau\,par}$ и СКО $\sigma^{ан}_{\tau\,par}$ распределения Парето определяются выражениями

$$m^{ан}_{\tau\,par} = \frac{\alpha \cdot k}{\alpha - 1}, \forall \alpha > 1; \quad (3)$$

$$\sigma^{ан}_{\tau\,par} = \sqrt{D_{\tau\,par}}; D_{\tau\,par} = \left(\frac{k}{\alpha - 1}\right)^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha - 2}, \forall \alpha > 2. \quad (4)$$

Также в работах [10-14] указывается, что показателем наличия у трафика свойства самоподобия, которое, в том числе, указывает на наличие у трафика структурной сложности, является коэффициент Херста. Также в работах [10-14] указывается, что существует зависимость между коэффициентом Херста H, и параметром формы α распределения Парето:

$$\alpha = 3 - 2H. \quad (5)$$

В работах [2, 15] проводился анализ снижения качества обслуживания трафика со сложной структурой по показателю своевременности обработки такого трафика при различных значениях коэффициента вариации c_τ. Оценка снижения качества обслуживания при наличии у трафика свойств самоподобия для различных значений коэффициента Херста H проводилась в работах [2, 9, 16] с использованием аналитических и численных методов. При этом, в связи с однозначной зависимостью, определяемой выражением (5), можно сделать вывод о факте снижения показателей качества обслуживания при наличии у трафика структурной сложности, определяемой как коэффициентом вариации c_τ, так и коэффициентом Херста H. Вместе с тем, исследования по снижению качества обслуживания с использованием имитационного моделирования, проведенные в широком диапазоне изменений входных параметров трафика, отсутствуют. При этом выводы такого исследования позволили бы проверить и обосновать достоверность результатов ранее опубликованных работ [2, 9, 15, 16], а также установить границы применимости аналитических методов для расчета обслуживания такого трафика в узлах СС.

Таким образом, целью данной работы является проведение оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{зад}$ на основе имитационного моделирования. В качестве моделей трафика со сложной структурой (c_τ>1) при

проведении имитационного моделирования обслуживания такого трафика использовались потоки заявок с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями. Оценивание показателей качества обслуживания этих потоков проводилось путем нормировки их по отношению к показателям качества обслуживания потока с пуассоновским распределением. В качестве программного средства для проведения имитационного моделирования использовалась среда GPSS World (General Purpose Simulation System).

Постановка задачи

Для формализации задачи по оценке уровня снижения своевременности обслуживания трафика в узлах СС по показателю времени задержки $T_{зад}$ за счет разработки и исследования имитационных моделей трафика со сложной структурой в виде потоков с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями интервала времени между поступлением очередных заявок введем следующие обозначения:

τ_{par} – интервал времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето;

α – параметр формы потока с распределением Парето;

k – коэффициент масштаба потока с распределением Парето;

ε – шаг дискретизации случайной величины τ_{par} при реализации распределения Парето в системе имитационного моделирования GPSS World;

m_τ – МОЖ значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$m^{ан}_{\tau\,par}$ – МОЖ значений интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, рассчитанное аналитически;

$m^{им}_{\tau\,par}$ – МОЖ значений интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, полученное на основе имитационного моделирования;

σ_τ – СКО значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$\sigma^{ан}_{\tau\,par}$ – СКО значений интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, рассчитанное аналитически;

$\sigma^{им}_{\tau\,par}$ – СКО значений интервала времени τ_{par} между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето, полученное на основе имитационного моделирования;

c_τ – коэффициент вариации интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$c_{\tau\,par}$ – коэффициент вариации интервала времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето;

$c_{\tau\,аппр}(\alpha)$ – аппроксимация зависимости коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$ от параметра формы α распределения Парето;

$\delta_{аппр}$ – средняя ошибка аппроксимации;

H – коэффициент Херста;

Q – объем буфера, $Q=\infty$;

$T_{зад}$ – время задержки заявки в системе массового обслуживания, состоящее из времени ожидания заявкой своего обслуживания и времени ее обслуживания;

$T_{зад\ par}$ – время задержки заявки в модели $Pa/M/1$;

$T_{зад\ exp}$ – время задержки заявки в модели $M/M/1$;

$T_{зад\ H2}$ – время задержки заявки в модели $H_2/M/1$;

$T_{ож}$ – время ожидания заявкой в буфере Q своего обслуживания;

μ – интенсивность обслуживания заявок в устройстве обслуживания;

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

$H_2(\lambda_1, \lambda_2, p_1, p_2)$ – гиперэкспоненциальное распределение потока 2-го порядка с интервалом времени τ_{H2} между поступлением очередных заявок;

λ_1 – интенсивность поступления заявок первой экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

λ_2 – интенсивность поступления заявок второй экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

p_1 – вероятность поступления заявок первой экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

p_2 – вероятность поступления заявок второй экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением;

τ_{H2} – интервал времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением;

$m_{\tau\ H2}^{им}$ – значение МОЖ интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, полученное при проведении имитационного моделирования;

$m_{\tau\ H2}^{треб}$ – требуемое значение МОЖ интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, используемое для расчета входных параметров для модели гиперэкспоненциального трафика;

$\sigma_{\tau\ H2}^{им}$ – значение СКО интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, полученное при проведении имитационного моделирования;

$c_{\tau\ H2}$ – коэффициент вариации интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением;

$c_{\tau\ H2}^{треб}$ – требуемое значение коэффициента вариации интервала времени между поступлением очередных заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением, используемое для расчета входных параметров модели гиперэкспоненциального трафика;

K – параметр, определяющий значения вероятностей поступления заявок как первой p_1 так и второй p_2 экспоненциальных фаз для модели гиперэкспоненциального трафика;

$T_{\text{ON-OFF 1}}$ – время, в течение которого ключ первой экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением находится в положение «ON» (включено);

$T_{\text{ON-OFF 2}}$ – время, в течение которого ключ второй экспоненциальной фазы потока с гиперэкспоненциальным распределением находится в положение «ON» (включено);

ρ – загрузка устройства обслуживания.

При проведении моделирования основным показателем структурной сложности потока выбран коэффициент вариации c_τ. За единицу модельного времени принят один такт обслуживания одной заявки исследуемого потока.

В качестве первой модели трафика со сложной структурой используется поток с Парето-распределением значений интервала времени между поступлением очередных заявок. Варьируемыми параметрами являются значения параметра формы α, коэффициента масштаба k распределения Парето, а также загрузка устройства обслуживания ρ. В качестве второй модели трафика со сложной структурой используется поток с гиперэкспоненциальным распределением значений интервала времени между поступлением очередных заявок. Варьируемыми параметрами являются значения интенсивностей поступления заявок первой λ_1 и второй λ_2 экспоненциальных фаз, вероятностей поступления заявок первой p_1 и второй p_2 экспоненциальных фаз, а также загрузка устройства обслуживания ρ, коэффициент вариации c_τ.

Целевая функция оценки качества обслуживания по показателю своевременности обслуживания трафика $T_{\text{зад}}$ будет иметь вид:

– для моделирования обслуживания трафика с распределением Парето

$$T_{\text{зад par}}=\varphi_{\text{par}}(\alpha, k, \rho, c_\tau);$$

– для моделирования обслуживания трафика с гиперэкспоненциальным распределением

$$T_{\text{зад exp}}=\varphi_{\text{H2}}(\lambda_1, \lambda_2, p_1, p_2, \rho, c_\tau).$$

На формальном уровне постановка задачи исследования имеет следующий вид.

$$F:\{\tau_{\text{вх}}\}\rightarrow\{T_{\text{зад}}\}.$$

Результаты, которые будут получены при проведении моделирования позволят обосновать перспективные требования к узловому оборудованию СС, что в дальнейшем позволит повысить своевременность обслуживания трафика со сложной структурой, циркулирующего в реальных СС.

Оценка адекватности использования потока с распределением Парето в качестве модели трафика со сложной структурой

В программной среде GPSS World при проведении имитационного моделирования трафика со сложной структурой вместо встроенного генератора заявок с Парето-распределением был использован генератор заявок, предложенный в работе [10], для получения более точных значений характеристик МОЖ $m^{\text{им}}_{\tau\,\text{par}}$ и СКО $\sigma^{\text{им}}_{\tau\,\text{par}}$ потока с распределением Парето, используемого в качестве модели (рис. 1, приложение 2). Генератор был

дополнен значением коэффициента масштаба k и позволил уменьшить шаг дискретизации ε генерируемой случайной величины τ_{par} со значения $\varepsilon=10^{-6}$ до значения $\varepsilon=10^{-12}$:

```
GENERATE (k#(Uniform(1,0,1)+1E-6#Uniform(1,0,1))^(-1/Alpha)).
```

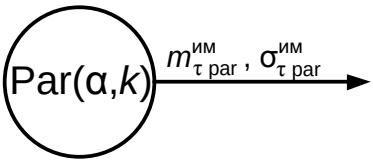


Рис. 1. Генератор трафика с распределением Парето

Значения статистических характеристик МОЖ $m^{им}_{\tau\,par}$ и СКО $\sigma^{им}_{\tau\,par}$ потока с распределением Парето, полученные в результате работы имитационной модели, а также значения статистических характеристик МОЖ $m^{ан}_{\tau\,par}$ и СКО $\sigma^{ан}_{\tau\,par}$, рассчитанные с помощью выражений (3, 4), в зависимости от изменения значений параметра формы αϵ(1; 2] при фиксированном значении коэффициента масштаба k=1, представлены в табл. 1 и на рис. 2, 3.

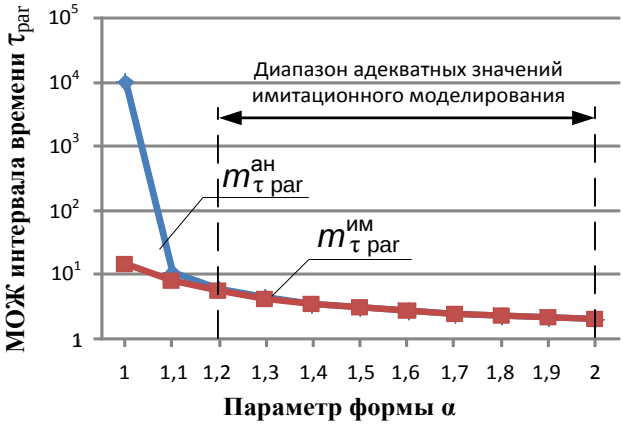


Рис. 2. Зависимость значений МОЖ, полученных при проведении имитационного моделирования $m^{им}_{\tau\,par}$ и аналитически $m^{ан}_{\tau\,par}$, от значений параметра формы α

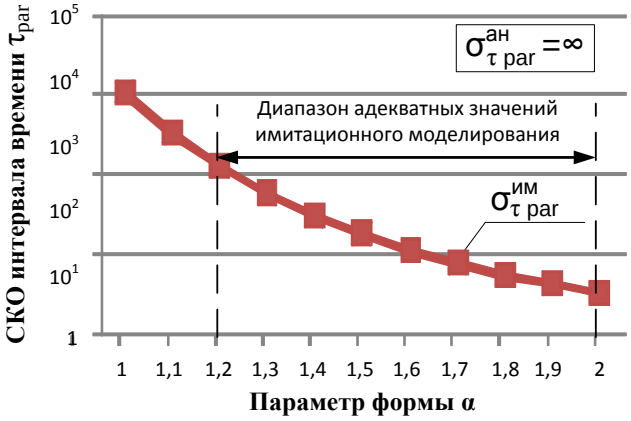


Рис. 3. Зависимость значений СКО, полученных при проведении имитационного моделирования $\sigma^{им}_{\tau\,par}$, от значений параметра формы α

Согласно выражению (4), СКО случайной величины τ_{par} потока с распределением Парето имеет значение $\sigma^{ан}_{\tau\,par}=\infty$ при значении параметра формы $\alpha\tau(1;\,2]$ [11, 13]. Точность реализации на имитационной модели СКО $\sigma^{им}_{\tau\,par}$ интервалов времени между поступлением очередных заявок потока с распределением Парето при увеличении значения параметра α снижается и достигает минимума $\sigma^{им}_{\tau\,par}$=3,23 при α=2. Это означает, что погрешность между значениями СКО, полученными аналитически $\sigma^{ан}_{\tau\,par}$ и с помощью

имитационной модели $\sigma^{им}_{\tau\,par}$, увеличивается при росте значения параметра формы α (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1 – Сравнение значений статистических характеристик МОЖ и СКО распределения Парето, полученных аналитически и на основе имитационного моделирования

Значения характеристик	Значения параметра формы α (при k=1)										
	1,0001	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
МОЖ, полученное аналитически $m^{ан}_{\tau\,par}$	10001	11,0	6,0	4,33	3,5	3,0	2,67	2,43	2,25	2,11	2,0
МОЖ, полученное на основе имитационного моделирования $m^{им}_{\tau\,par}$	14,442	8,08	5,48	4,19	3,45	2,98	2,66	2,43	2,25	2,11	2,0
Погрешность имитационного моделирования относительно аналитического, %	99,8	26,5	8,6	3,2	1,43	0,6	0,37	0	0	0	0
СКО, полученное аналитически $\sigma^{ан}_{\tau\,par}$	Равно ∞, так как имеет конечные значения только при α>2										
СКО, полученное на основе имитационного моделирования $\sigma^{им}_{\tau\,par}$	1051,2	332,88	129,72	59,44	30,99	17,93	11,30	7,64	5,48	4,12	3,23
Погрешность имитационного моделирования относительно аналитического, %	Увеличивается при росте значения параметра формы α										

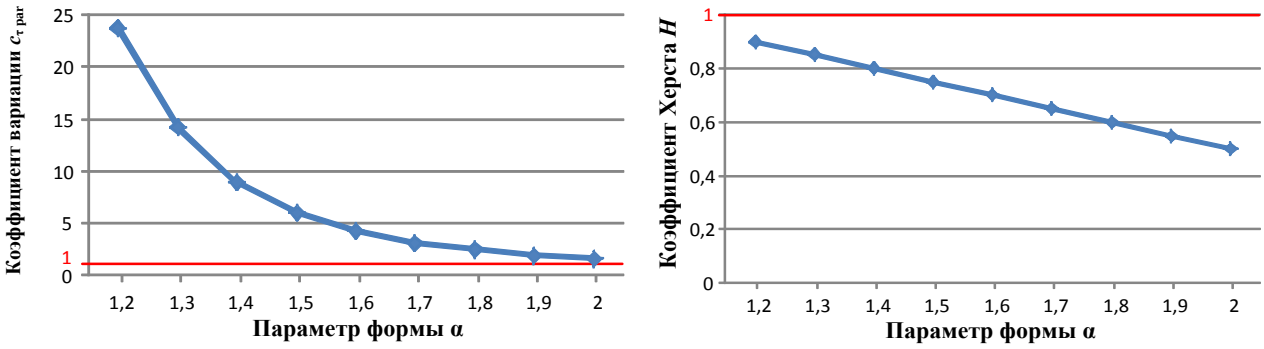
Таким образом, можно сделать вывод, что использование распределения Парето при проведении имитационного моделирования трафика со сложной структурой ограничено адекватностью полученных при моделировании оценок МОЖ и СКО аналитическим расчетам. В связи с вышеуказанным, использование в имитационном моделировании трафика со сложной структурой распределения Парето предлагается ограничить диапазон параметра $\alpha \in [1{,}2;\ 2]$.

Также в ходе проведения имитационного моделирования трафика со сложной структурой модель потока с распределением Парето, представленная в приложении 2, была проверена на масштабируемость путем изменения значений коэффициента масштаба k в диапазоне $k \in [10^{-3};\ 10^{3}]$. Результаты представлены в табл. 2. Были получены значения коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$, вычисленные по выражению (1) в соответствии со значениями МОЖ $m^{им}_{\tau\,par}$ и СКО $\sigma^{им}_{\tau\,par}$ из табл. 1, а также получены значения коэффициента Херста H, рассчитанного в соответствии с выражением (5).

Таблица 2 – Значения параметра α и соответствующих ему значений коэффициентов вариации $c_{\tau\,par}$ и Херста H

Значения коэффициентов	Значение параметра формы α распределения Парето при $k\in[10^{-3}; 10^{3}]$, $\alpha\in[1{,}2; 2]$								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
вариации $c_{\tau\,par}$ (согласно выражению (1))	23,67	14,18	8,98	6,01	4,25	3,14	2,44	1,95	1,62
Херста H (согласно выражению (5))	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5

В табл. 2 и на рис. 4 вместе со значениями коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$, рассчитанного с помощью выражения (1), согласно полученным в результате моделирования значениям статистических характеристик МОЖ $m^{им}_{\tau\,par}$ и СКО $\sigma^{им}_{\tau\,par}$ (табл. 1), представлены значения коэффициента Херста H, рассчитанного в соответствии с выражением (5), при различных значениях $\alpha\in[1{,}2; 2]$.



а б

Рис. 4. Зависимость значений коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$ (а) и коэффициента Херста H (б) от параметра формы α распределения Парето при $k\in[10^{-3}; 10^{3}]$, $\alpha\in[1{,}2; 2]$

На основе полученных результатов моделирования трафика со сложной структурой, представленных в табл. 2 и на рис. 4 было выявлено, что коэффициент вариации $c_{\tau\,par}$ снижается при увеличении значения параметра α и не зависит от значений коэффициента k, что было проверено для диапазона значений $k\in[10^{-3}; 10^{3}]$. Таким образом, оба показателя $c_{\tau\,par}$ и H можно использовать в качестве показателя структурной сложности трафика.

Также при анализе результатов моделирования было выявлено, что полученные значения коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$ имеют экспоненциальную зависимость относительно значений параметра формы α при $\alpha\in[1{,}2; 2]$ (рис. 4а). Для аналитического обобщения результатов имитационного моделирования

потока с распределением Парето (табл. 3, рис. 4а) была предложена аппроксимация зависимости коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$ от параметра α

$$c_{\tau\,аппр}(\alpha)=1{,}41\cdot10^{4}\cdot e^{-5.384\cdot\alpha}+1{,}52\text{, где }\alpha\in[1{,}2;\,2]. \qquad (6)$$

Средняя ошибка аппроксимации $\delta_{аппр}$ определяется выражением

$$\delta_{аппр}=\frac{1}{n}\cdot\sum\frac{\left|c_{\tau\,аппр}(\alpha)-c_{\tau\,par}\right|}{c_{\tau\,аппр}(\alpha)}\cdot100\%, \qquad (7)$$

где значения $c_{\tau\,аппр}(\alpha)$ определяются согласно выражению (6); $c_{\tau\,par}$ – согласно выражению (1); n – число значений параметра α (здесь n=9).

Оценки значений коэффициента вариации, полученные в результате имитационного моделирования $c_{\tau\,par}$, а также значения $c_{\tau\,аппр}(\alpha)$, полученные в соответствии с функцией аппроксимации (6), представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты оценки значений коэффициентов вариации, полученные в результате имитационного моделирования $c_{\tau\,par}$ и в соответствии с функцией аппроксимации $c_{\tau\,аппр}(\alpha)$

Значения коэффициентов вариации	Параметр формы α распределения Парето								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
в результате имитационного моделирования $c_{\tau\,par}$	23,67	14,18	8,98	6,01	4,25	3,14	2,44	1,95	1,62
по функции аппроксимации $c_{\tau\,аппр}(\alpha)$	23,566	14,388	9,03	5,904	4,08	3,014	2,392	2,03	1,817
Ошибка аппроксимации $\delta_{аппр}$, %	3,27								

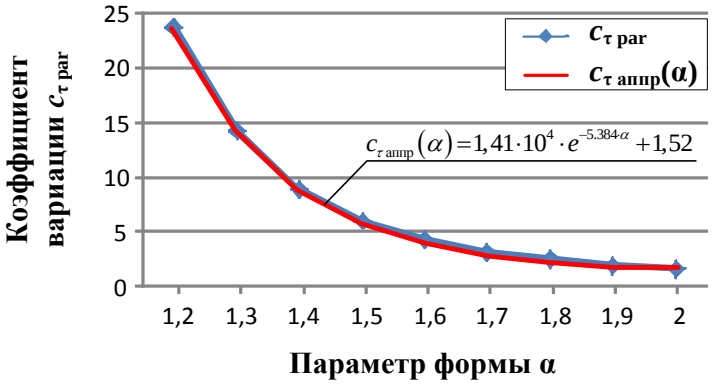


Рис. 5. Зависимость значений коэффициентов вариации, полученных в результате моделирования $c_{\tau\,par}$ и по функции аппроксимации $c_{\tau\,аппр}(\alpha)$, от значений параметра формы α∈[1,2; 2] распределения Парето

В работе [9], было определено, что коэффициент Херста для мультисервисного трафика, циркулирующего в реальных СС, находится в диапазоне значений $H\in[0{,}75;\,0{,}95]$. Это подтверждается результатами исследования, проведенного в работе [17], где рассчитано, что среднее значение

коэффициента Херста мультисервисного трафика имеет значение H=0,8. Таким образом, можно утверждать, что диапазон значений параметра $\alpha\epsilon[1,2; 2]$ распределения Парето, который удовлетворяет условию адекватности моделируемых значений МОЖ $m^{им}_{\tau\,par}$ и СКО $\sigma^{им}_{\tau\,par}$, является адекватным для решения задачи проведения имитационного моделирования работы узлового оборудования СС в условиях передачи трафика со сложной структурой (c_τ>1).

Исследование имитационной модели обслуживания потока с распределением Парето *Pa*/*M*/1

Для исследования времени задержки $T_{зад\,par}$ при обслуживании потока заявок с распределением Парето (моделирующего трафик со сложной структурой (c_τ>1)) узловым оборудованием СС с экспоненциальным временем обслуживания была разработана имитационная модель типа *Pa*/*M*/1 (рис. 6). Текст модели, составленный в среде GPSS World, представлен в приложении 3).

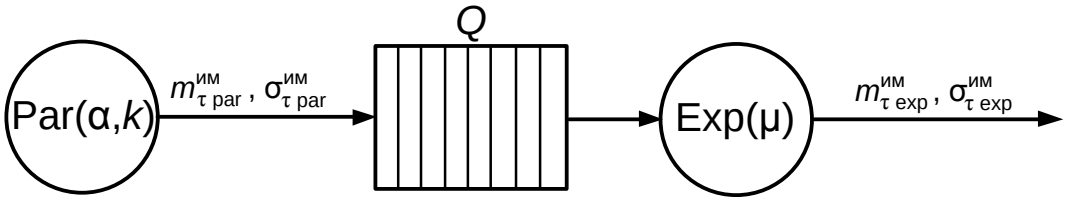


Рис. 6. Имитационная модель *Pa*/*M*/1 обслуживания трафика с распределением Парето

При проведении имитационного моделирования были введены следующие ограничения:

1) объем буфера $Q=\infty$;
2) время обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{обсл}=1/\mu=1$;
3) значение коэффициента масштаба распределения Парето $k\epsilon[0,1; 1]$;
4) значение параметра формы распределения Парето $\alpha\epsilon[1,2; 2]$.

При проведении моделирования было замечено, что в среде GPSS World практически 90% полученных значений интервала времени между заявками были равны $\tau_{par}\approx1\ldots10k$. При этом максимальное число заявок, ожидавших обслуживания в буфере Q было равно 12. Это связано с тем, что минимальное значение интервала времени между заявками τ_{par} определяются коэффициентом $k=\min(\tau_{par})=1$.

Для оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика в узлах СС по показателю времени задержки $T_{зад\,par}$ разработанная имитационная модель *Pa*/*M*/1 (рис. 6, приложение 3) была исследована на масштабируемость при различных значениях параметров $\alpha\epsilon[1,2; 2]$ и $k\epsilon[0,1; 1]$. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты исследования на масштабируемость имитационной модели *Pa*/*M*/1 при различных значениях параметров α∈[1,2; 2], *k*∈[0,1; 1]

Входные параметры	$T_{обсл}$=1											
	Коэффициент вариации c_τ			23,6	14,17	8,97	6	4,25	3,15	2,44	1,95	1,62
	Коэффициент Херста *H*			0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Параметр формы α			*1,2*	*1,3*	*1,4*	*1,5*	*1,6*	*1,7*	*1,8*	*1,9*	*2*
Выходные характеристики	Коэффициент масштаба *k*	*1*	$m_\tau^{им}$	6	4,33	3,5	3	2,67	2,43	2,25	2,11	2
			$T_{зад\ exp}$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
			$T_{зад\ par}$	1,31	1,34	1,37	1,4	1,43	1,47	1,5	1,53	1,57
		0,9	$m_\tau^{им}$	5,4	3,9	3,15	2,7	2,4	2,185	2,025	1,9	1,8
			$T_{зад\ exp}$	1,225	1,34	1,46	1,59	1,71	1,84	1,975	2,111	2,25
			$T_{зад\ par}$	1,4	1,44	1,48	1,53	1,57	1,62	1,68	1,73	1,78
		0,8	$m_\tau^{им}$	4,8	3,467	2,8	2,4	2,13	1,94	1,8	1,69	1,6
			$T_{зад\ exp}$	1,26	1,4	1,55	1,71	1,88	2,06	2,25	2,45	2,67
			$T_{зад\ par}$	1,52	1,59	1,65	1,72	1,8	1,88	1,97	2,1	2,2
		0,7	$m_\tau^{им}$	4,2	3	2,45	2.1	1,867	1,7	1,575	1,48	1,4
			$T_{зад\ exp}$	1,31	1,5	1,69	1,91	2,153	2,43	2,74	3,08	3,5
			$T_{зад\ par}$	1,72	1,82	1,94	2,06	2,2	2,36	2,54	2,74	2,98
		0,6	$m_\tau^{им}$	3,6	2,6	2,1	1,8	1,6	1,48	1,35	1,267	1,2
			$T_{зад\ exp}$	1,38	1,62	1,91	2,25	2,67	3,085	3,85	4,73	5,96
			$T_{зад\ par}$	2,06	2,25	2,47	2,74	3,06	3,47	3,74	4,7	5,68
		0,5	$m_\tau^{им}$	3	2,17	1,75	1,5	1,33	1,21	1,125	1,055	1
			$T_{зад\ exp}$	1,5	1,85	2,33	3	4,02	5,73	8,94	18,7	724
			$T_{зад\ par}$	2,8	3,2	3,77	4,6	5,9	8	12,5	26,2	419,2
		0,4	$m_\tau^{им}$	2,4	1,73	1,4	1,2	1,067	0,97	0,9	0,84	0,8
			$T_{зад\ exp}$	1,71	2,37	3,5	5,96	15,8	14700	49700	79700	99700
			$T_{зад\ par}$	4,58	6,2	9,2	17	55	13600	49000	76700	99000
		0,3	$m_\tau^{им}$	1,8	1,3	1,05	0,9	0,8	0,728	0,675	0,63	0,6
			$T_{зад\ exp}$	2,25	1,74	19	49700	99700	135600	162100	184600	199600
			$T_{зад\ par}$	14,1	37	499	51200	99000	135000	161600	182400	199000
		0,2	$m_\tau^{им}$	1,2	0,86	0,7	0,6	0,53	0,48	0,485	0,45	0,4
			$T_{зад\ exp}$	5,7	69700	149600	199600	234600	259600	257000	274600	299500
			$T_{зад\ par}$	967	78700	153000	200600	233000	256500	274000	288000	299000
		0,1	$m_\tau^{им}$	0,6	0,43	0,35	0,3	0,267	0,243	0,225	0,21	0,2
			$T_{зад\ exp}$	199600	284600	324600	349500	366000	378000	387000	395000	399500
			$T_{зад\ par}$	224000	290000	326000	350000	366000	378000	387000	395000	400000

В табл. 5 значения времени задержки заявок потока с распределением Парето $T_{зад\ par}$, представлены в нормированном виде по отношению к значениям времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением $T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$ (значения $T_{зад\ par}$ и $T_{зад\ exp}$ берутся из табл. 4), при одинаковом времени обслуживания $T_{обсл}$=1 заявок для этих потоков.

Таблица 5 – Количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{зад}$ (имитационная модель $Pa/M/1$)

Входные параметры	$T_{обсл}=1$											
	Коэффициент вариации c_τ			23,6	14,17	8,97	6	4,25	3,15	2,44	1,95	1,62
	Коэффициент Херста H			0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Параметр формы α			*1,2*	*1,3*	*1,4*	*1,5*	*1,6*	*1,7*	*1,8*	*1,9*	*2*
Выходные характеристики	Коэффициент масштаба k	*1*	$m_\tau^{им}$	6	4,33	3,5	**3**	2,67	2,43	2,25	2,11	2
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,091667	1,030769	0,978571	0,933333	0,89375	0,864706	0,833333	0,805263	0,785
		0,9	$m_\tau^{им}$	5,4	3,9	3,15	2,7	2,4	2,185	2,025	1,9	**1,8**
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,142857	1,074627	1,013699	0,962264	0,918129	0,880435	0,850633	0,819517	0,791111
		0,8	$m_\tau^{им}$	4,8	3,467	2,8	2,4	2,13	1,94	**1,8**	1,69	1,6
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,206349	1,135714	1,064516	1,005848	0,957447	0,912621	0,875556	0,857143	0,82397
		0,7	$m_\tau^{им}$	4,2	**3**	2,45	2.1	1,867	1,7	1,575	1,48	1,4
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,312977	1,213333	1,147929	1,078534	1,02183	0,971193	0,927007	0,88961	0,851429
		0,6	$m_\tau^{им}$	3,6	2,6	2,1	**1,8**	1,6	1,48	1,35	1,267	1,2
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,492754	1,388889	1,293194	1,217778	1,146067	1,124797	0,971429	0,993658	0,95302
		0,5	$m_\tau^{им}$	**3**	2,17	1,75	1,5	1,33	1,21	1,125	1,055	1
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,866667	1,72973	1,618026	1,533333	1,467662	1,396161	1,39821	1,40107	0,579006
		0,4	$m_\tau^{им}$	2,4	1,73	1,4	1,2	1,067	0,97	0,9	0,84	0,8
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	2,678363	2,616034	2,628571	2,852349	3,481013	0,92517	0,985915	0,962359	0,992979
		0,3	$m_\tau^{им}$	**1,8**	1,3	1,05	0,9	0,8	0,728	0,675	0,63	**0,6**
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	6,266667	21,26437	26,26316	1,030181	0,992979	0,995575	0,996915	0,988082	0,996994
		0,2	$m_\tau^{им}$	1,2	0,86	0,7	**0,6**	0,53	0,48	0,485	0,45	0,4
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	169,6491	1,129125	1,022727	1,00501	0,99318	0,988059	1,066148	1,048798	0,998331
		0,1	$m_\tau^{им}$	**0,6**	0,43	0,35	0,3	0,267	0,243	0,225	0,21	0,2
			$T_{зад\ рег}/T_{зад\ exp}$	1,122244	1,018974	1,004313	1,001431	1	1	1	1	1,001252

Значения времени задержки $T_{\text{зад exp}}$ для потока с экспоненциальным распределением получены при исследовании имитационной модели $M/M/1$ (текст имитационной модели, составленный в среде GPSS World, представлен в приложении 1). При проведении моделирования были введены ограничения:

1) объем буфера $Q=\infty$;
2) время обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{\text{обсл}}=1/\mu=1$;
3) значения МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с экспоненциальным распределением равны соответствующим значениям МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с распределением Парето $m^{\text{им}}_{\tau\,\text{exp}} = m^{\text{им}}_{\tau\,\text{par}} = m^{\text{им}}_{\tau}$, определены в соответствии с выражением (3) и записаны в табл. 4 в ячейках, выделенных синим цветом.

Проанализировав результаты, полученные в ходе исследования модели $Pa/M/1$, которые представлены в табл. 5, было выявлено, что нескольким парам значений (α, k) соответствует одно и то же значение МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с распределением Парето $m^{\text{им}}_{\tau\,\text{par}}$ (пример таких пар значений (α, k) приведен в табл. 5 для МОЖ $m^{\text{им}}_{\tau\,\text{par}}$, имеющих значения 0,6, 1,8 и 3). Однако чем меньше значения параметра формы α и коэффициента масштаба k, тем больше значение времени задержки $T_{\text{зад par}}$ (значение отношения $T_{\text{зад par}}/T_{\text{зад exp}}$).

Анализ результатов моделирования в части соотношения времен задержек $T_{\text{зад par}}/T_{\text{зад exp}}$ позволил определить три субобласти $D_1 \epsilon D$, $D_2 \epsilon D$, $D_3 \epsilon D$ с различными значениями параметра α и коэффициента k (табл. 5, рис. 7):

1) область $D_1=\{\alpha\epsilon[1{,}4;\,2],\, k\epsilon[0{,}6;\,1]\}$ – область, в которой отношение времен задержек заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями (значения времени задержки для потоков рассчитаны в моделях $Pa/M/1$ и $M/M/1$ соответственно) всегда имеет значения $\left(T_{\text{зад par}}/T_{\text{зад exp}}\right)<1$. В области D_1 время задержки заявок потока с Парето-распределением имеет значения $T_{\text{зад par}}\epsilon[1{,}37;\,5{,}68]$, которые всегда меньше значений времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением $T_{\text{зад exp}}\epsilon[1{,}4;\,5{,}96]$. Это говорит о том, что при любых значениях $(\alpha, k)\epsilon D_1$ трафик с распределением Парето обслуживается с более высокой степенью своевременности, чем экспоненциальный. Область D_1 выделена в табл. 5 и на рис. 7 зеленым цветом.
2) область $D_2=\{\alpha\epsilon[1{,}2;\,1{,}9],\, k\epsilon[0{,}2;\,1]\}$ – область, в которой отношение времен задержек заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями (значения времени задержки для потоков рассчитаны в моделях $Pa/M/1$ и $M/M/1$ соответственно), всегда имеет значения $\left(T_{\text{зад par}}/T_{\text{зад exp}}\right)>1$. В данной области D_2 время задержки заявок потока с Парето-распределением имеет значения $T_{\text{зад par}}\epsilon[1{,}31;\,967]$, которые всегда больше значений времени задержки заявок потока

с экспоненциальным распределением $T_{\text{зад exp}} \in [1{,}2;\ 19]$. Причем $\forall \alpha \in D_2 \mid k < 0{,}5,\ k \in D_2$ отношение времен задержек заявок потоков имеет значения $\left(T_{\text{зад par}} / T_{\text{зад exp}}\right) > 2$, что говорит о более чем двукратном снижении времени обработки потока с распределением Парето по сравнению с обслуживанием экспоненциального потока. Область D_2 выделена на рис. 7 фиолетовым цветом.

3) область D_3={α∈[1,2; 1,9], k∈[0,2; 1]} – область, в которой отношение времен задержек заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями в моделях *Pa*/*M*/1 и *M*/*M*/1 соответственно, имеет значения $0{,}55 < \left(T_{\text{зад par}} / T_{\text{зад exp}}\right) < 1{,}2$. Анализ значений отношений времен задержек потоков $T_{\text{зад par}} / T_{\text{зад exp}}$ в областях D_1 и D_3 показал, что они имеют практически равные значения. Однако в области D_3 по сравнению с областью D_1 время задержки заявок потоков с экспоненциальным и Парето-распределением имеет б*о*льшие на несколько порядков значения $T_{\text{зад exp}} \in [724;\ 4 \cdot 10^5)$ и $T_{\text{зад par}} \in (419;\ 4 \cdot 10^5]$. Область D_3 соответствует перегрузке устройства обслуживания и выделена в табл. 5 и на рис. 7 красным цветом.

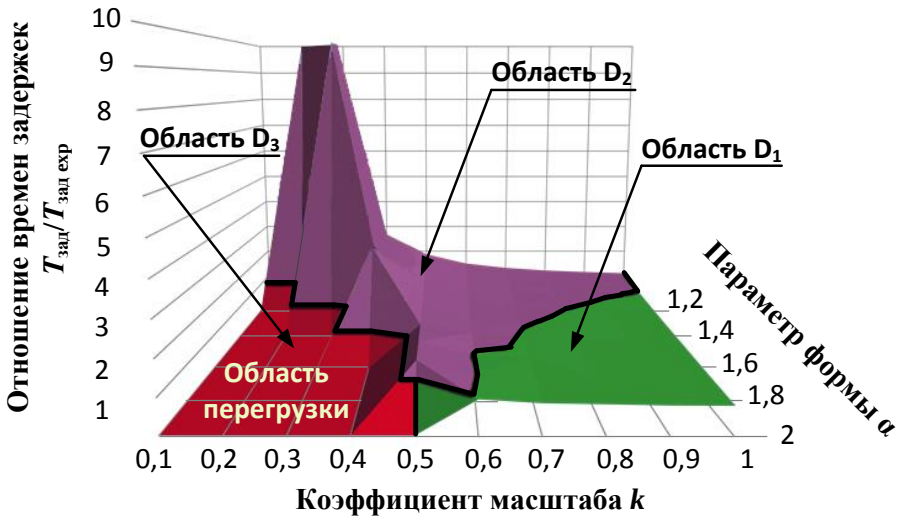


Рис. 7. Количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{\text{зад par}}$ (имитационная модель *Pa*/*M*/1)

Комплексным критерием дифференцирования области D является система

$$D = \begin{cases} D_1,\ \textit{если}\ \left(T_{\text{зад par}} / T_{\text{зад exp}}\right) < 1,\ \ m^{\text{им}}_{\tau\ \text{par}} > T_{\text{обсл}}; \\ D_2,\ \textit{если}\ \left(T_{\text{зад par}} / T_{\text{зад exp}}\right) > 1,\ \ m^{\text{им}}_{\tau\ \text{par}} > T_{\text{обсл}}; \\ D_3,\ \textit{если}\ 0{,}55 < \left(T_{\text{зад par}} / T_{\text{зад exp}}\right) < 1{,}2,\ \ m^{\text{им}}_{\tau\ \text{par}} \le T_{\text{обсл}}. \end{cases} \quad (8)$$

Также по результатам проведенного моделирования можно сделать вывод о том, что на значение времени задержки $T_{зад}$ влияет загрузка ρ устройства обслуживания, которая при выбранном ограничении на время обслуживания в устройстве $T_{обсл}=1/\mu=1$, зависит от значений МОЖ интервала времени между поступлением заявок m_{τ}. В свою очередь, согласно выражению (3), на значение МОЖ $m_{\tau\,par}^{ан}$ потока с Парето-распределением влияют значения параметра формы α и коэффициента масштаба *k*. Тогда выражение для вычисления значения загрузки устройства обслуживания имеет вид

$$\rho = \frac{T_{обсл}}{m_{\tau\,par}^{ан}} = \frac{T_{обсл}\cdot(\alpha-1)}{\alpha\cdot k}. \qquad (9)$$

Из выражения (9) можно определить предельные условия, когда загрузка ρ устройства обслуживания имитационной модели *Pa*/*M*/1 будет иметь предельное значение ρ=1. Подставив данное значение загрузки ρ=1 в выражение (9) при фиксированном значении времени обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{обсл}=1/\mu=1$ и заданных значениях параметра формы из диапазона αϵ[1,2; 2], получаем выражение для области предельных значений коэффициента *k*, которые приводят к полной загрузке устройства обслуживания (рис. 8)

$$k = \frac{T_{обсл}\cdot(\alpha-1)}{\alpha}. \qquad (10)$$

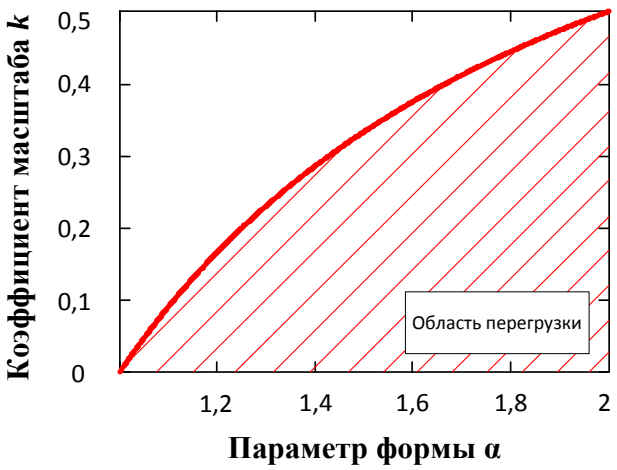


Рис. 8. Предельные значения коэффициента масштаба *k* при различных значениях параметра формы αϵ[1,2; 2], которые приводят к перегрузке устройства обслуживания

Таблица 6 – Предельные значения коэффициента масштаба k при различных значениях параметра формы $\alpha \in [1,2; 2]$, которые приводят к перегрузке устройства обслуживания

Параметр формы α	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Предельные значения коэффициента k	0,167	0,231	0,286	0,333	0,375	0,412	0,444	0,474	0,5

Результаты, представленные на рис. 8 и в табл. 6, подтверждают результаты проведенного исследования модели $Pa/M/1$ по оценке уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{зад\ par}$, представленные в табл. 4.

Полученные результаты имеют качественную сходимость результатов имитационного моделирования с результатами работ [1-6, 9, 15-17].

Мультисервисному трафику свойственна, так называемая, «пачечность», что подтверждается результатами анализа трафика реальных СС, представленными в работах [18-20].

Исследование имитационной модели обслуживания потока с гиперэкспоненциальным распределением $H_2/M/1$

Использование потока с распределением Парето не позволяет смоделировать указанное свойство реального трафика, в связи с чем, предлагается перейти к моделированию трафика на основе «ON-OFF» моделей. Данный способ моделирования, апробированный в работах [21-23], позволяет не только обеспечить формирование потока со сложной структурой (c_τ>1), но и воспроизвести наличие свойств «пачечности» трафика.

В качестве «ON-OFF» модели трафика со сложной структурой предлагается использовать ранее разработанную автором имитационную модель [24], которая представлена на рис. 9 (текст модели в среде GPSS представлен в приложении 5). Эта модель позволяет моделировать трафик со сложной структурой (c_τ>1) в виде потока с гиперэкспоненциальным распределением интервала времени τ_{H2} между очередными пакетами и заданным коэффициентом вариации $c_{\tau\ H2}$. В данной модели поток заявок с гиперэкспоненциальным распределением H_2 формируется с помощью двух экспоненциальных фаз Exp(λ_1) и Exp(λ_2) (потоков с экспоненциальными распределениями интервалов времени между очередными заявками, имеющие различные интенсивности поступления заявок).

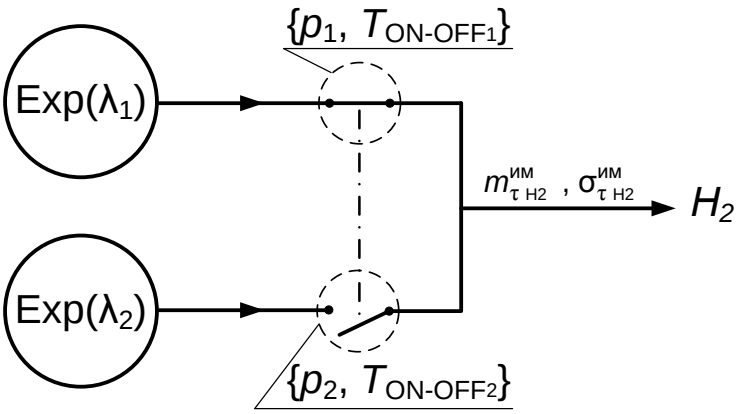


Рис. 9. Имитационная модель трафика со сложной структурой с гиперэкспоненциальным распределением H_2 [24]

Включение ключей первой и второй экспоненциальных фаз Exp(λ_1) и Exp(λ_2) (рис. 9) происходит на различное время $T_{\text{ON-OFF 1}}$ и $T_{\text{ON-OFF 2}}$, определяемое в соответствии с системой [24]

$$\begin{cases} T_{\text{ON-OFF}_i} = 50/\lambda_i; \\ i = 1, 2; \\ \lambda_1 < \lambda_2. \end{cases} \tag{11}$$

Коэффициент, равный 50, в первом выражении системы (11) был подобран эмпирически с учетом заданного уровня адекватности имитационной модели.

Имитационная модель $H_2/M/1$ обслуживания трафика с гиперэкспоненциальным распределением представлена на рис. 10. Текст имитационной модели, составленный в среде GPSS World, представлен в приложении 6.

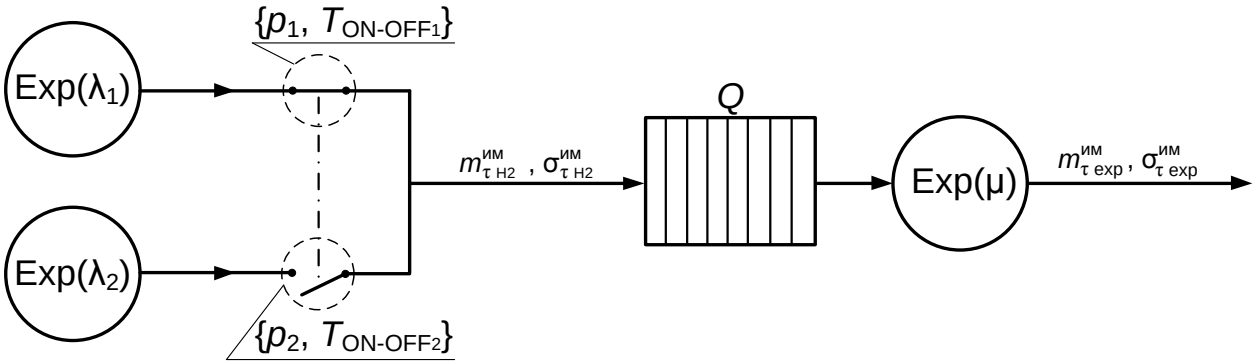


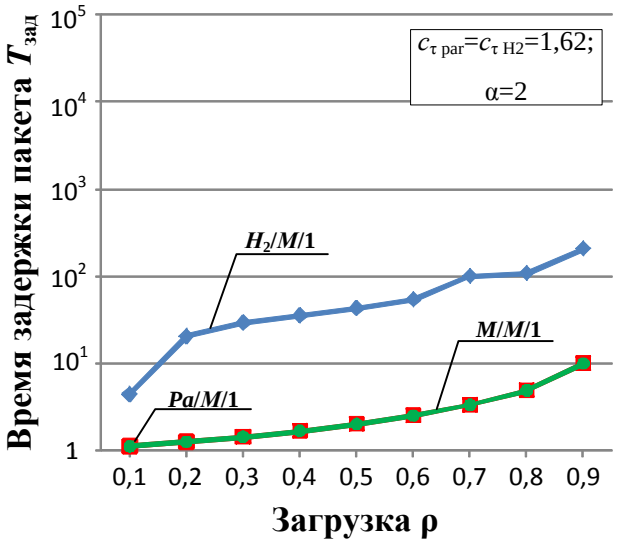
Рис. 10. Имитационная модель $H_2/M/1$ обслуживания трафика с гиперэкспоненциальным распределением

Результаты оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания, полученные при исследовании модели $H_2/M/1$, а также их сравнение с результатами, полученными для моделей обслуживания трафика с Парето $Pa/M/1$ и экспоненциальным $M/M/1$ распределениями, представлены в табл. 7, рис. 11 и табл. 8, рис. 12.

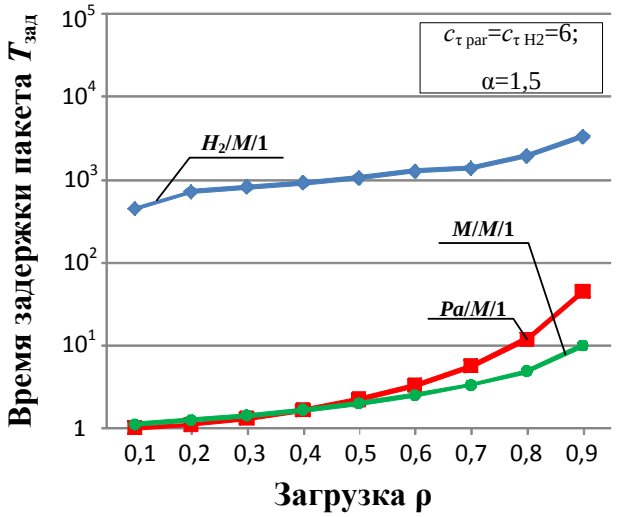
Таблица 7 – Результаты оценки уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{зад}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания

Входные параметры	$T_{обсл}$			1								
	Загрузка ρ			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	МОЖ m_τ, соответствующее значению загрузки ρ при $T_{обсл}$=1			10	5	3,333	2,5	2	1,667	1,427	1,25	1,111
Выходные характеристики	Экспон.		$T_{зад\ exp}(\rho)$	1,11	1,25	1,43	1,67	2,0	2,5	3,33	4,87	9,95
	Парето	$c_{\tau\ par}$=1,62 α=2	k^*	5,0	2,5	1,667	1,25	1,0	0,834	0,714	0,625	0,556
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,0	1,04	1,13	1,3	1,57	2,01	2,81	4,56	10,5
		$c_{\tau\ par}$=1,95 α=1,9	k^*	4,737	2,368	1,579	1,184	0,947	0,79	0,677	0,592	0,526
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,001	1,042	1,148	1,33	1,624	2,109	3,0	5,015	12,03
		$c_{\tau\ par}$=2,44 α=1,8	k^*	4,444	2,222	1,48	1,11	0,889	0,741	0,635	0,556	0,494
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,002	1,05	1,169	1,372	1,7	2,25	3,286	5,646	14,36
		$c_{\tau\ par}$=3,15 α=1,7	k^*	4,117	2,059	1,372	1,029	0,823	0,686	0,588	0,515	0,457
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,003	1,061	1,2	1,43	1,81	2,46	3,71	6,67	18,92
		$c_{\tau\ par}$=4,2 α=1,6	k^*	3,75	1,875	1,25	0,938	0,75	0,625	0,536	0,468	0,417
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,005	1,077	1,24	1,513	1,968	2,771	4,367	8,54	26,23
		$c_{\tau\ par}$=6 α=1,5	k^*	3,333	1,667	1,111	4	0,667	0,556	0,476	0,417	0,37
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,01	1,1	1,31	1,65	2,23	3,3	5,61	11,9	44,85
		$c_{\tau\ par}$=8,97 α=1,4	k^*	2,857	1,429	0,952	0,714	0,571	0,476	0,408	0,357	0,317
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,016	1,15	1,42	1,88	2,73	4,38	8,29	21,09	103
		$c_{\tau\ par}$=14,2 α=1,3	k^*	2,308	1,154	0,769	0,577	0,462	0,385	0,33	0,288	0,256
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,033	1,24	1,65	2,4	3,88	7,22	16,74	57.52	449,4
		$c_{\tau\ par}$=23,6 α=1,2	k^*	1,667	0,834	0,556	0,417	0,333	0,278	0,238	0,208	0,185
			$T_{зад\ par}(\rho)$	1,08	1,48	2,31	4,1	8,6	22,2	78,5	463,6	5360
	Гиперэксп.	$c_{\tau\ H2}$=1,62	$T_{зад\ H2}(\rho)$	4,4	20,37	28,9	34,9	42,6	53,3	69,9	104,6	210
		$c_{\tau\ H2}$=6		448,1	712,9	814,4	909,7	1050	1265	1371	1934	3304
		$c_{\tau\ H2}$=23,6		6878	11283	14722	18640	15356	20322	19866	34153	87013

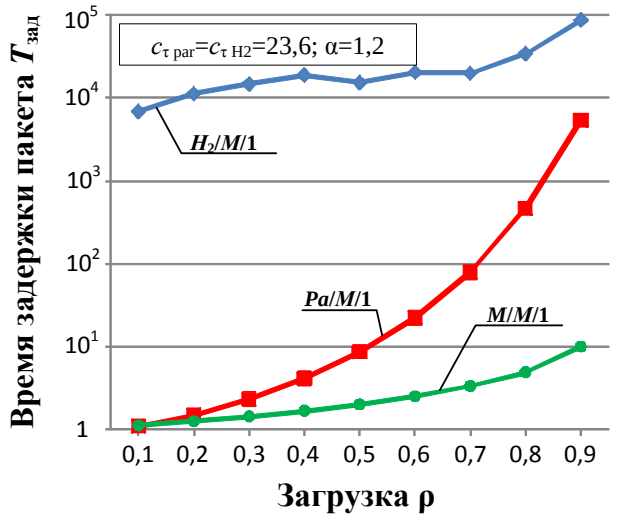
Примечание: значение k^* приведено справочно и соответствует указанному в таблице уровню загрузки ρ устройства обслуживания в соответствии с выражением (9).



а.



б.

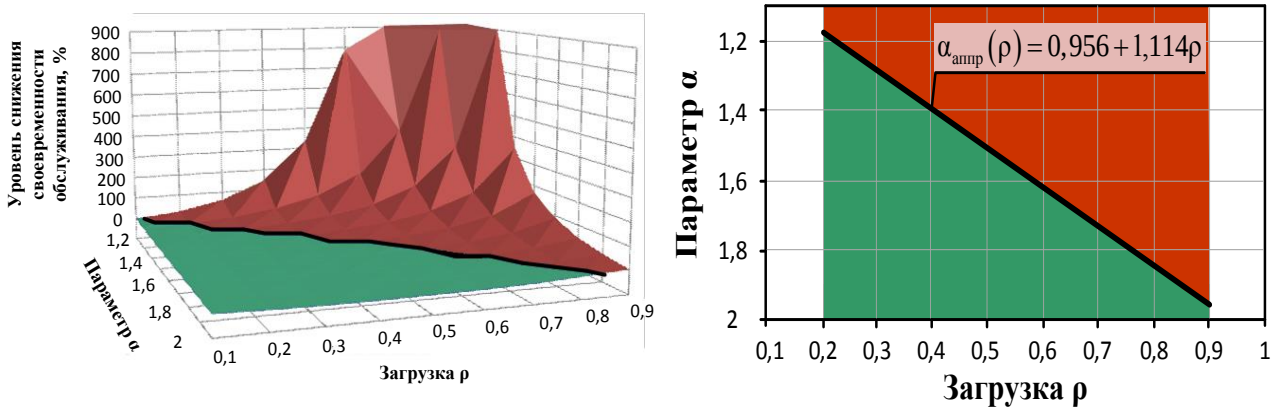


в.

Рис. 11. Зависимость времени задержки пакета $T_{зад}$ от загрузки ρ для моделей $M/M/1$, $Pa/M/1$, $H_2/M/1$ при различных значениях коэффициента вариации: а. – c_τ=1,62; б. – c_τ=6; в. – c_τ=23,6

Таблица 8 – Количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением по показателю времени задержки $T_{зад}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания

Входные параметры	$T_{обсл}$			1								
	Загрузка ρ			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	МОЖ m_τ, соответствующее значению загрузки ρ при $T_{обсл}$=1			10	5	3,333	2,5	2	1,667	1,427	1,25	1,111
Выходные характеристики	Парето	$c_{\tau\ par}$=1,62 α=2	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,9	0,832	0,79	0,78	0,785	0,8	0,84	0,94	1,05
		$c_{\tau\ par}$=1,95 α=1,9	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,9	0,83	0,8	0,8	0,81	0,84	0,9	1,03	1,21
		$c_{\tau\ par}$=2,44 α=1,8	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,9	0,84	0,82	0,82	0,85	0,9	0,99	1,16	1,44
		$c_{\tau\ par}$=3,15 α=1,7	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,9	0,85	0,84	0,86	0,91	0,98	1,11	1,37	1,9
		$c_{\tau\ par}$=4,2 α=1,6	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,9	0,86	0,87	0,91	0,98	1,11	1,31	1,75	2,64
		$c_{\tau\ par}$=6 α=1,5	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,91	0,88	0,92	0,99	1,12	1,32	1,68	2,44	4,51
		$c_{\tau\ par}$=8,97 α=1,4	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,92	0,92	0,99	1,13	1,37	1,75	2,49	4,33	10,4
		$c_{\tau\ par}$=14,2 α=1,3	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,93	0,99	1,15	1,44	1,94	2,89	5,0	11,8	45,17
		$c_{\tau\ par}$=23,6 α=1,2	$T_{зад\ par}/T_{зад\ exp}$	0,97	1,18	1,62	2,46	4,3	8,9	23,6	95,2	538,7
	Гиперэксп.	$c_{\tau\ H2}$=1,62	$T_{зад\ H2}/T_{зад\ exp}$	3,97	16,3	20,2	20,9	21,3	21,3	21	21,5	21,1
		$c_{\tau\ H2}$=6		403,7	570,3	569,5	544,7	525	506	411,7	397,1	332
		$c_{\tau\ H2}$=23,6		6196,4	9026,4	10295,1	11161,7	7678	8128,8	5965,8	7013	8745



а. б.

Рис. 12. а. – Уровень снижения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой по отношению к трафику с экспоненциальным распределением в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания и значения параметра формы α; б. – функция аппроксимации $\alpha_{аппр}(\rho)$ значений параметра формы α при различной загрузке ρ устройства обслуживания, в которых происходит резкое снижение своевременности обслуживания трафика со сложной структурой

Загрузка ρ устройства обслуживания рассчитывается по выражению

$$\rho = \frac{T_{обсл}}{m_{\tau\,H2}^{треб}} = \frac{T_{обсл}}{m_{\tau\,par}^{ан}} = \frac{T_{обсл}\cdot(\alpha-1)}{\alpha\cdot k}, \qquad (12)$$

где $m_{\tau\,H2}^{треб} = m_{\tau\,par}^{ан}$ – требуемое значение МОЖ интервала времени τ_{H2} между заявками генерируемого гиперэкспоненциального потока.

В качестве ограничений при исследовании модели $H_2/M/1$ использовались:

1) коэффициент вариации $c_{\tau\,H2}$, равный значениям коэффициента вариации потока с Парето-распределением $c_{\tau\,par}$ при определенных значениях параметра $\alpha\in[1,2; 2]$. При этом диапазон выбранных значений параметра α соответствует значениям коэффициентов вариации $c_\tau>1$ и Херста $H\in[0,75; 0,95]$, которые, как показано в работах [9, 17], соответствуют мультисервисному трафику в реальных СС;
2) время обработки в устройстве обслуживания $T_{обсл}=1/\mu=1$;
3) загрузка устройства обслуживания $\rho\in[0,1; 0,9]$.

Значения входных и полученных результатов нормированы ко времени $T_{обсл}$, которое принято за единицу.

Расчет входных параметров модели потока с гиперэкспоненциальным распределением проводится в соответствии с выражениями [7]:

1) для интенсивностей поступления заявок первой λ_1 и второй λ_2 экспоненциальных фаз гиперэкспоненциального потока

$$\lambda_1 = \frac{1}{m_{\tau\,H2}^{треб}\cdot\left[1+\sqrt{\frac{p_2}{2p_1}(c_{\tau\,H2}^{треб})^2-1)}\right]}, \qquad (13)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{m_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{p_1}{2p_2}(c_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}})^2 - 1)}\right]}, \quad (14)$$

где $c_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}}$ – требуемое значение коэффициента вариации потока с гиперэкспоненциальным распределением

2) для вероятностей p_1 и p_2 поступления заявок первой второй экспоненциальных фаз гиперэкспоненциального потока

$$p_1 \le \frac{2K}{1 + (c_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}})^2}, \quad (15)$$

$$p_2 = 1 - p_1, \quad (16)$$

где $K \in (0; 1)$ – параметр, определяющий значения вероятностей поступления заявок первой p_1 и второй p_2 экспоненциальных фаз. При проведении моделирования параметр K был выбран равным K=0,9;

3) значение МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением равно значению МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с Парето-распределением $m_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}} = m_{\tau\,\text{par}}^{\text{ан}}$, где $m_{\tau\,\text{par}}^{\text{ан}}$ вычисляется согласно выражению (3).

Пример расчета входных параметров λ_1, λ_2, p_1, p_2 (по выражениям 13, 14, 15, 16) для проведения имитационного моделирования обслуживания трафика $H_2/M/1$ со значениями коэффициента вариации $c_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}}$=23,6 и МОЖ интервала времени между поступлением заявок потока с гиперэкспоненциальным распределением $m_{\tau\,\text{H2}}^{\text{треб}}$=1,111, который выполнен в программной в среде MathCAD, представлен в приложении 4.

Выводы

В результате проведенного имитационного моделирования обслуживания трафика со сложной структурой с использованием моделей систем массового обслуживания с входными потоками с Парето - $Pa/M/1$ и гиперэкспоненциальным $H_2/M/1$ распределениями были получены оценки качества обслуживания такого трафика по показателю времени задержки заявки в системе, нормированные к значениям времени задержки потока с экспоненциальным распределением $T_{\text{зад par}}/T_{\text{зад exp}}$. В качестве критерия структурной сложности моделей трафика использовался коэффициент вариации c_τ интервала времени между очередными заявками. При проведении моделирования трафика со сложной структурой коэффициент вариации потоков принимал значения $c_\tau \in [1{,}62; 23{,}6]$, рассматриваемый диапазон загрузки узлового оборудования $\rho \in [0{,}1; 0{,}9]$.

Чтобы получить адекватные количественные оценки по показателю времени задержки $T_{\text{зад}}$ пакета в системе для моделей $Pa/M/1$, $H_2/M/1$ необходимо, чтобы выполнялись несколько условий:

1) значения МОЖ и коэффициентов вариации интервалов времени между поступлением очередных заявок потоков с Парето- и гиперэкспоненциальным распределениями должны иметь равные значения $m^{им}_{\tau\,par} = m^{им}_{\tau\,H2}$, $c^{им}_{\tau\,par} = c^{им}_{\tau\,H2}$. При этом для потока с распределением Парето значение МОЖ $m^{им}_{\tau\,par}$ определяется значениями параметра α и коэффициента *k*. Для потока с гиперэкспоненциальным распределением значения МОЖ $m^{им}_{\tau\,H2}$ и коэффициента вариации $c_{\tau\,H2}$ рассчитываются в программе (приложение 4). Однако в исследуемом диапазоне значений параметров α∈[1,2; 2], *k*∈[0,1; 1] потока с Парето-распределением возникают такие моменты, что при некоторых комбинациях {α; *k*} значения МОЖ $m^{им}_{\tau\,par}$ потока с распределением Парето имеют одинаковые значения. Значения коэффициента вариации $c_{\tau\,par}$ при этом различны;
2) время обработки заявки в устройстве обслуживания $T_{обсл}$=1/μ=1;
3) объем буфера *Q*=∞.

В процессе исследования модели *Pa*/*M*/1было определено, что:

1) своевременность обслуживания трафика со сложной структурой в узлах СС по показателю времени задержки $T_{зад}$ в большей степени зависит от загрузки ρ узлового оборудования (табл. 7);
2) получена функция аппроксимации значений параметра формы α∈[1,2; 2] при различной загрузке ρ∈[0,1; 0,9] устройства обслуживания, в которых происходит резкое снижение своевременности обслуживания трафика со сложной структурой $\alpha_{аппр}(\rho) = 0{,}956 + 1{,}114\rho$ (рис. 12);
3) для каждого значения параметра α∈[1,2; 2] существуют такие предельные значения коэффициента масштаба *k* распределения Парето, при которых происходит перегрузка устройства обслуживания ρ→∞ (рис. 8);
4) определены три области (рис. 7):
   – область нормального функционирования устройства обслуживания D_1;
   – область загрузки устройства обслуживания D_2;
   – область перегрузки D_3 устройства обслуживания, в которых отношение времен задержек $T_{зад\,par}/T_{зад\,exp}$ заявок потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями имеет значения $T_{зад\,par}/T_{зад\,exp} \in (0{,}55; 1{,}2)$. Определение данных областей реализовано в более общей работе автора о возможном преобразовании распределения трафика для снижения его структурной сложности [25].

При исследовании имитационной модели H_2/*M*/1 обслуживания потока с гиперэкспоненциальным распределением получена количественная оценка уровня снижения своевременности обслуживания относительно потоков

с Парето- и с экспоненциальным распределениями. Получены оценки уровня снижения своевременности обслуживания по показателю времени задержки $T_{зад}$ в зависимости от уровня загрузки ρ устройства обслуживания и от значения коэффициента вариации c_τ (табл. 8).

На основе полученных данных имитационного моделирования можно сделать вывод о том, что своевременность обслуживания в узлах СС трафика с распределением Парето по показателю времени задержки $T_{зад}$ при повышении загрузки узлового оборудования сети связи от 0,1 до 0,9 и значении коэффициента вариации интервала времени между пакетами трафика, равному 6 – снижается в 4,5 раза, а при значении коэффициента вариации, равному 23,6 – снижается в 539 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика. Для гиперэкспоненциального распределения при тех же значениях загрузки сети связи от 0,1 до 0,9 и значении коэффициента вариации интервала времени между пакетами трафика, равному 6 – своевременность обслуживания снижается в 332 раза, а при значении коэффициента вариации, равному 23,6 – снижается более чем в 8000 раз по сравнению с обслуживанием экспоненциального трафика (табл. 8).

Таким образом, результаты, которые были получены при проведении моделирования позволяют обосновать перспективные требования к узловому оборудованию СС для повышения своевременности обслуживания трафика со сложной структурой, циркулирующего в реальных СС.

Приложение 1.

Программа имитационной модели обслуживания экспоненциального трафика в узле СС

```
; 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.

Программа имитационной модели трафика с распределением Парето

```
; 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
Alpha     EQU      1.0001         ; Параметр формы распределения Парето
k         EQU      1              ; Коэффициент масштаба распределения Парето
Moj       EQU      (Alpha#k)/(Alpha-1)        ; МОЖ распределения Парето
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)   ; Функция вычисления значений интервалов
                                  ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                  ; (разность абсолютного модельного времени
                                  ; и сохраненного значения ячейки "Time")
;  Блок генерации трафика Парето
          GENERATE (k#(Uniform(1,0,1)+1E-6#Uniform(1,0,1))^(-1/Alpha))  ; Генера-
                                  ; тор пакетов трафика с Парето-распределением
                                  ; с шагом дискретизации ε=10^-12
          SAVEVALUE Delta,V$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
          TERMINATE 1             ; Вывести из системы обслуженный пакет
          START 1000000           ; Генерация 1 млн. пакетов
```

Приложение 3.

Программа имитационной модели обслуживания трафика с распределением Парето в узле СС

```
; 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
```

Приложение 4.

Расчет исходных данных для моделирования трафика сложной структуры

Задание требуемого значения коэффициента вариации интервалов времени между поступлением пакетов трафика сложной структуры

МОЖ трафика Н2 **Коэффициент вариации** Параметр К

$\lambda_obsh := 0.9$

$t_obsh_1 := \frac{1}{\lambda_obsh} = 1.111$ $c := 23.6$ $K := 0.9$

Вероятность поступления пакетов первой экспоненциальной фазы

$p_1(c) := \frac{2 \cdot K}{1 + c^2}$

Вероятность поступления пакетов второй экспоненциальной фазы

$p_2(c) := 1 - p_1(c)$

МОЖ первой экспоненциальной фазы

$t_1(c) := t_obsh_1 \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{p_2(c) \cdot (c^2 - 1)}{2 \cdot p_1(c)}}\right]$

$\lambda_1(c) := \frac{1}{t_1(c)}$

МОЖ второй экспоненциальной фазы

$t_2(c) := t_obsh_1 \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{p_1(c) \cdot (c^2 - 1)}{2 \cdot p_2(c)}}\right]$

$\lambda_2(c) := \frac{1}{t_2(c)}$

МОЖ трафика сложной структуры

$t_moj_1(c) := (p_1(c) \cdot t_1(c) + p_2(c) \cdot t_2(c))$

$t_moj_1(c) \rightarrow 1.1111111111111111119999958$

Значения исходных данных для моделирования трафика сложной структуры

$p_1(c) \rightarrow 0.00322603770879632948 6$

$p_2(c) \rightarrow 0.9967739622912036705 14$

$t_1(c) \rightarrow 326.7437198663979019908$

$t_2(c) \rightarrow 0.0572081052143976222053 4$

Приложение 5.

Программа имитационной модели гиперэкспоненциального трафика

```
;Блок описания используемых переменных
VrDelta   TABLE    X$Delta,0,1,60 ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                  ; времени между пакетами входного трафика
          INITIAL  X$Time,0       ; Установить начальное значение "Time",
                                  ; равным нулю
Ver1      EQU      0.396          ; Значение вероятности p1 1-й экспоненциальной
                                  ; фазы гиперэкспоненциального трафика
Ver2      EQU      (1-Ver1)       ; Значение вероятности p2 2-й экспоненциальной
                                  ; фазы гиперэкспоненциального трафика
T1        EQU      2.79           ; МОЖ интервала времени между очередными
                                  ; пакетами 1-й экспоненциальной фазы
T2        EQU      0.009          ; МОЖ интервалов времени между очередными
                                  ; пакетами 2-й экспоненциальной фазы
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)   ; Функция вычисления значений интервала
                                  ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                  ; (разность абсолютного модельного времени
                                  ; и сохраненного значения ячейки "Time")
; Имитация работы ключей, формирующих гиперэкспоненциальное
распределение
          GENERATE,,,1            ; Генерация одного транзакта, управляющего
                                  ; переключением ключей выбора экспоненц. фазы
Variator  TRANSFER Ver1,Met2,Met1 ; Включение 1-го ключа с вероятностью "Ver1",
                                  ; а второго - с вероятностью "Ver2"
Met1      TRANSFER,Klu1           ; Отправить транзакт на 1-й ключ "Klu1"
Met2      TRANSFER,Klu2           ; Отправить транзакт на 2-й ключ "Klu2"
Klu1      LOGIC S  Kluch1         ; Включить ключ 1-й экспоненциальной фазы
          ADVANCE  (T1#50)        ; Время нахождения ключа
                                  ; в состоянии «ON» равно (T1#50)
          LOGIC R  Kluch1         ; Выключить ключ 1-й экспоненциальной фазы
          TRANSFER,Variator       ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                  ; ключа "Variator"
Klu2      LOGIC S  Kluch2         ; Включить ключ 2-й экспоненциальной фазы
          ADVANCE  (T2#50)        ; Время нахождения ключа
                                  ; в состоянии «ON» равно (T2#50)
          LOGIC R  Kluch2         ; Выключить ключ 2-й экспоненциальной фазы
          TRANSFER,Variator       ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                  ; ключа "Variator"
; Имитация работы экспоненциальных фаз
          GENERATE (Exponential(1,0,T1))     ; Трафик 1-й экспоненциальной фазы
                                  ; с МОЖ интервала времени между поступлением
                                  ; пакетов, равным T1
          GATE LS  Kluch1,Met10   ; Проверка на предмет определения состояния
                                  ; 1-го ключа (если "ON" – переход к следующей
                                  ; строчке программы, "OFF" –переход на Met10)
          TRANSFER,Met20          ; Отправка пакета на Met20
          GENERATE (Exponential(29,0,T2))    ; Трафик 2-й экспоненциальной фазы
                                  ; с МОЖ интервалов времени между поступлением
                                  ; пакетов, равным T2
          GATE LS  Kluch2,Met10   ; Проверка на предмет определения состояния
                                  ; 2-го ключа (если "ON" – переход к следующей
                                  ; строчке программы, "OFF" –переход на Met10)
          TRANSFER,Met20          ; Отправка пакета на Met20
; Накопление статистики
Met20     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
          TERMINATE 1             ; Вывести из системы обслуженный пакет
Met10     TERMINATE               ; Вывести из системы необслуженный пакет
          START 1000000           ; Генерация 1 млн. пакетов
```

Приложение 6.

Программа имитационной модели обслуживания гиперэкспоненциального трафика в узле СС

```
;Блок описания используемых переменных
VrDelta   TABLE    X$Delta,0,1,60 ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                  ; времени между пакетами входного трафика
          INITIAL  X$Time,0       ; Установить начальное значение "Time",
                                  ; равным нулю
VrObsl    TABLE    MP2,0,20,35    ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                  ; времени обслуживания пакетов входного трафика
Ver1      EQU      0.396          ; Значение вероятности p1 1-й экспоненциальной
                                  ; фазы гиперэкспоненциального трафика
Ver2      EQU      (1-Ver1)       ; Значение вероятности p2 2-й экспоненциальной
                                  ; фазы гиперэкспоненциального трафика
T1        EQU      2.79           ; МОЖ интервала времени между очередными
                                  ; пакетами 1-й экспоненциальной фазы
T2        EQU      0.009          ; МОЖ интервалов времени между очередными
                                  ; пакетами 2-й экспоненциальной фазы
T_obsl    EQU      1              ; Среднее время обслуживания пакета
                                  ; в устройстве"OKU"
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)   ; Функция вычисления значений интервала
                                  ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                  ; (разность абсолютного модельного времени
                                  ; и сохраненного значения ячейки "Time")
;     Имитация работы ключей, формирующих гиперэкспоненциальное распределение
          GENERATE,,,1            ; Генерация одного транзакта, управляющего
                                  ; переключением ключей выбора экспоненц. фазы
Variator  TRANSFER Ver1,Met2,Met1 ; Включение 1-го ключа с вероятностью "Ver1",
                                  ; а второго - с вероятностью "Ver2"
Met1      TRANSFER ,Klu1          ; Отправить транзакт на 1-й ключ "Klu1"
Met2      TRANSFER ,Klu2          ; Отправить транзакт на 2-й ключ "Klu2"
Klu1      LOGIC S  Kluch1         ; Включить ключ 1-й экспоненциальной фазы
          ADVANCE  (T1#50)        ; Время нахождения ключа
                                  ; в состоянии «ON» равно (T1#50)
          LOGIC R  Kluch1         ; Выключить ключ 1-й экспоненциальной фазы
          TRANSFER ,Variator      ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                  ; ключа "Variator"
Klu2      LOGIC S  Kluch2         ; Включить ключ 2-й экспоненциальной фазы
          ADVANCE  (T2#50)        ; Время нахождения ключа
                                  ; в состоянии «ON» равно (T2#50)
          LOGIC R  Kluch2         ; Выключить ключ 2-й экспоненциальной фазы
          TRANSFER ,Variator      ; Отправить транзакт на цикл выбора рабочего
                                  ; ключа "Variator"
; Имитация работы экспоненциальных фаз
          GENERATE (Exponential(1,0,T1))     ; Трафик 1-й экспоненциальной фазы
                                  ; с МОЖ интервала времени между поступлением
                                  ; пакетов, равным T1
          GATE LS  Kluch1,Met10   ; Проверка на предмет определения состояния
                                  ; 1-го ключа (если "ON" – переход к следующей
                                  ; строчке программы, "OFF" –переход на Met10)
          TRANSFER ,Met20         ; Отправка пакета на Met20
          GENERATE (Exponential(29,0,T2))    ; Трафик 2-й экспоненциальной фазы
                                  ; с МОЖ интервалов времени между поступлением
                                  ; пакетов, равным T2
          GATE LS  Kluch2,Met10   ; Проверка на предмет определения состояния
                                  ; 2-го ключа (если "ON" – переход к следующей
                                  ; строчке программы, "OFF" –переход на Met10)
          TRANSFER ,Met20         ; Отправка пакета на Met20
;  Накопление статистики
Met20     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
Met10     TERMINATE                ; Вывести из системы необслуженный пакет
          START 1000000            ; Обслужить 1 млн. пакетов
```

Литература

1. 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.

2. 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.

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

4. 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.

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

6. Макаренко С. И. Преднамеренное формирование информационного потока сложной структуры за счет внедрения в систему связи дополнительного имитационного трафика // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 3 (4). С. 7-13.

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

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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: 30.10.2015).

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

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Маколкина М. А. Разработка и исследование моделей оценки качества передачи видео в IP-сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. – СПб., 2014. – 187 с.

17. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. — М.: Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 2004. — 199 с.

18. Нейман В. И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Труды Международной академии связи. 1999. № 1 (9). С. 11-15.

19. Шелухин О. И., Тенякишев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография / Под ред. О. И. Шелухина. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.

20. Шелухин О. И., Осин А. В., Смольский С. М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / Под ред. О. И. Шелухина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.

21. Шелухин О. И., Лукьянцев Д. А. Многоуровневая ON/OFF модель интернет-трафика корпоративной сети спутниковой связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2006. Т. 2. № 2. С. 59-64.

22. Кучук Г. А., Можаев А. А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2007. № 8 (27). С. 261-271.

23. Благов А. В., Привалов А. Ю. Модификации моделей типа «входная $M/G/\infty$» и «On-Off источники» для имитационного моделирования самоподобного телекоммуникационного трафика // Труды МАИ. 2010. № 39. С. 1-15. URL: https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14802 (дата обращения: 30.10.2015).

24. Ушанев К. В. Имитационная модель формирования трафика сложной структуры // Информационные технологии моделирования и управления. 2014. № 3 (87). С. 263-272.

25. Ушанев К. В., Макаренко С. И. Преобразование структуры трафика с учетом требований по качеству его обслуживания // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 2. С. 74-84.

References

1. Bakhareva N. F., Kartashevskii I. V., Tarasov V. N. Analiz i raschet nepuassonovskikh modelei trafika v setiakh EVM [The Analysis and Calculation of Not-Poisson Traffic Models in Computer Networks]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 61-66 (in Russian).

2. Bakhareva N. F., Tarasov V. N., Ushakov U. A. Obobshchennaia dvumernaia diffuzionnaia model' massovogo obsluzhivaniia tipa *GI*/*G*/1 [The Generalized Two-Dimensional Diffusion Waiting Line Model of Type *GI*/*G*/1]. *Telecommunications*, 2009, no. 7, pp. 2-8 (in Russian).

3. Bakhareva N. F., Ushakov U. A. Upravlenie nagruzkoi na seti EVM raspoznavaniem i modelirovaniem trafika [Load Control of the Computer Network with Recognition and Simulation of Traffic]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 56-62 (in Russian).

4. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Gorelov G. A. Matematicheskaia model' trafika s tiazhelokhvostnym raspredeleniem na osnove sistemy massovogo obsluzhivaniia $N_2/M/1$ [The Mathematical Model of Traffic with Heavy Tail Distribution on the Basis of Queuing System Type of $N_2/M/1$]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 36-41 (in Russian).

5. Makarenko S. I. Analyzing of Mathematical Models of General Type Data Streams and Degree of Their Conformity to Integral Service Net Traffic. *Voronezh State Technical University*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 28-35 (in Russian).

6. Makarenko S. I. Premeditated Formation of the Traffic of Difficult Structure Due to Implementation in the Communication System of Additional Imitative Traffic. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 7-13 (in Russian).

7. 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).

8. 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*, 2013, no. 8, pp. 54-60 (in Russian).

9. 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, State Academy of Consumer Services, 2005. 164 p. (in Russian).

10. 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).

11. 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 October 2015) (in Russian).

12. 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).

13. Ageev D. V., Ignatenko A. A., Kopylev A. V. Metodika opredeleniia parametrov potokov na raznykh uchastkakh mul'tiservisnoi telekommunikatsionnoi seti s uchetom effekta samopodobiia [Technique of Determination of Parameters of Streams on Different Sites of a Multiservice Telecommunication Network taking into Account Effect of Self-Similarity]. *Problems of telecommunications*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 18-37 (in Russian).

14. Fedorova M. L., Ledeneva T. M. Ob issledovanii svoistva samopodobiia trafika mul'tiservisnoi seti [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).

15. 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).

16. 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).

17. 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).

18. Neiman V. I. Samopodobnye protsessy i ikh primenenie v teorii teletrafika [Self-Similar Processes and their Application in the Teletraffic Theory]. *Trudi Mezhdunarodnoj akademii svjazi*, 1999, vol. 9, no. 1, pp. 11-15 (in Russian).

19. Sheluhin O. I., Tenyakishev A. M., Osin A. V. *Fraktal'nye protsessy v telekommunikatsiiakh. Monografija* [Fractal Processes in Telecommunications. Treatise]. Moscow, Radioengeneering Publ., 2003. 480 p. (in Russian).

20. Sheluhin O. I., Osin A. V., Smolskij S. M. *Samopodobie i fraktaly. Telekommunikatsionnye prilozheniia* [Self-Similarity and Fractals. Telecommunication Applications]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 368 p. (in Russian).

21. Sheluhin O. I., Lukyantsev D. A. Mnogourovnevaia ON/OFF model' internet-trafika korporativnoi seti sputnikovoi sviazi [Multi-Level ON/OFF Model of Internet Traffic of Corporate Satellite Network]. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 59-64 (in Russian).

22. Kuchuk G. A., Mozhaev A. A. Prognozirovanie trafika dlia upravleniia peregruzkami integrirovannoi telekommunikatsionnoi seti [Predicting traffic congestion management integrated telecommunications network]. *Electronic and computer systems*, 2007, vol. 27, no. 8, pp. 261-271 (in Russian).

23. Blagov A. V., Privalov A. U. Modifikatsii modelei tipa "vkhodnaia $M/G/\infty$" i "On-Off istochniki" dlia imitatsionnogo modelirovaniia samopodobnogo telekommunikatsionnogo trafika [Modification of the model of the "input $M/G/\infty$" and "On-Off sources" for the simulation of self-similar telecommunication traffic]. *Trudy MAI*, 2010, no. 39, pp. 1-15. Available at: https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14802 (accessed 30 October 2015) (in Russian).

24. Ushanev K. V. Imitatsionnaia model' formirovaniia trafika slozhnoi struktury [Imitating Model of Formation of a Traffic with Structural Complicatedity]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2014, vol. 87, no. 3, pp. 263-272 (in Russian).

25. Ushanev K. V., Makarenko S. I. Preobrazovanie struktury trafika s uchetom trebovanii po kachestvu ego obsluzhivaniia [Transformation of the Traffic Structure Considering Requirements on Quality of its Service]. *Radio and telecommunication systems*, 2015, no. 2, pp. 74-84 (in Russian).

Статья поступила 19 ноября 2015 г.

Информация об авторе

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

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

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

K. V. Ushanev

Problem statement: *currently share growth of multimedia traffic in communication networks, as well as the need to ensure the requirements of consumers of telecommunications services, makes the question of quality of service traffic at the nodes of the complicated structure of networks.* ***The purpose*** *is to estimate the delay of packets at the nodes of the communications network serving the complicated structure of the traffic based on the developed simulation model. As a criterion of the complicatedity of the traffic using the coefficient of variation interval between successive packets. As a model of a complicated structure traffic streams are used having Hyperexponential Pareto distribution and a wide range of variation of the input parameters and load level nodal network equipment.* ***The methods used:*** *model node equipment formalized on the basis of scientific-methodological apparatus of queuing theory and implemented in a software environment simulation GPSS World.* ***The novelty*** *of this work is to measure the quality of service traffic complicated structure in terms of delay in servicing equipment units in the network, resulting study developed simulation models of traffic service and Pareto hyperexponential distribution in a wide range of variation of the input parameters.* ***The results:*** *Based on data obtained from studies of simulation models of traffic service type Pa/M/*1*, H_2/M/*1*, it is determined that timely traffic service with a complicated structure in communication nodes in terms of time delay depends essentially on the load node equipment. In the study of the simulation model of service traffic distribution Pareto Pa/M/*1*, it was found that the coefficient of variation interval between successive applications of such traffic has an exponential dependence on the values of the shape parameter Pareto distribution. Also, for a given range of flow parameters with a Pareto distribution, determining the load control devices (at a fixed time of service), characterized by three areas in which the delay time of the flow of applications to the Pareto distribution of matter: more than the delay time for the flow to an exponential distribution; less than the delay time for the stream with an exponential distribution; practically equal to the values of time delay for a flow with an exponential distribution. It is also defined the criteria for selecting each of the areas. The limiting values of the scale for the flow of a Pareto distribution, which lead to an overload device maintenance. In the study of the simulation model of H_2/M/*1to quantify the level of reduction of timeliness flow hyperexponential distribution with respect to the flow Pareto distribution and exponential distribution. Estimations of reducing the level of service in terms of the timeliness of the delay time depending on the download service and the device on the value of the coefficient of variation. Based on the simulation data concluded that the timeliness of service nodes in communication networks with complicated structure Traffic Pareto distribution in terms of the delay time is reduced. At higher loading equipment nodal network to 0.9 and increase the coefficient of variation of the interval time between packets to 23.6 timely maintenance reduced to 539 times as compared with the exponential service traffic. Hyperexponential distribution for the same values of load network and the coefficient of variation is reduced to timely servicing of 8000 times in comparison with the exponential service traffic.* ***Practical significance:*** *A simulation model and obtained during the simulation results allow to justify the long-term requirements for the speed of communication networks equipment units, which later will ensure timely service complicated structure traffic.*

Keywords: *communication network, simulation, quality of service, Hurst coefficient, the coefficient of variation, the property of self-similarity properties of fractal.*

Information about Author

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

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

УДК 681.324

Адаптивный алгоритм компенсации эхо-сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена

Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А., Белов А. А.

Постановка задачи: *В работе рассматривается рекуррентная адаптивная компенсация эхо-сигналов по конечному числу выборок в пределах скользящего окна данных. Рассматривается адаптивный алгоритм, построенный на основе ввода блока адаптивных фильтров. Каждый фильтр обеспечивает компенсацию эха только в своем диапазоне задержек, локализованных в окрестности задержки максимального значения автокорреляционной функции эха. Это позволяет реализацию такого алгоритма с применением корреляционно-экстремального метода оценивания параметров эхо-сигналов. Таким образом, в рассматриваемом алгоритме эхо-компенсации может быть применены адаптивные фильтры с уменьшенным числом отводов, что повышает устойчивость и скорость сходимости таких фильтров.* ***Используемые методы:*** *обобщенные методы параметрической оптимизации, метод адаптивной компенсации эхо-сигналов, методы наименьших квадратов и теории матриц.* ***Результат:*** *в работе показано, что рассмотренный алгоритм обеспечивает высокую скорость сходимости и высокую степень подавления эха при настроенном адаптивном фильтре в окрестности локализованной задержки.*

Ключевые слова: *телекоммуникационные системы, аудиообмен, алгоритмы компенсации, эхо-сигналы, многоканальный алгоритм.*

Введение

Потребность в компенсации эхо-сигналов возникает при построении систем телекоммуникаций аудиообмена, систем громкоговорящей связи [1]. Сложность решения этой задачи во многом обусловливается большими задержками в каналах распространения эха, которые для указанных систем могут достигать величины порядка пятисот миллисекунд и более [2, 3, 4]. В этих условиях фильтр с конечной импульсной характеристикой, входящий в состав компенсатора, должен иметь порядок равный нескольким тысячам, что существенно снижает скорость настройки [2, 3]. Решить эту проблему можно, если ввести блок адаптивных фильтров, каждый из которых обеспечивает компенсацию только в своем диапазоне задержек, локализованных в окрестности некоторых значимых значений. В этом случае порядок фильтров заметно уменьшается, а если число каналов эха находится в пределах от трех до пяти, то и по суммарному числу настраиваемых коэффициентов имеет место заметный выигрыш.

Целью настоящей работы является рассмотрение характеристик алгоритма компенсации эха, основанного на временной селекции и методе наименьших квадратов. При этом параметры каналов эхо-сигналов, их значимые значения задержек и затуханий принимаются известными из результатов его корреляционного анализа. Известным принимается и опорный сигнал – сигнал источника эха.

Структурная схема адаптивного алгоритма компенсации эхо-сигналов

Схема адаптивного фильтра компенсации в одном из каналов эха приведена на рис. 1. На этом рисунке переменная $\hat{D}_k$ обозначает оценку задержки в $k-$канале эха, $\hat{a}_k$ – нормирующий множитель (оценка затухания в указанном канале) и $L-$ порядок фильтра. При этом сигнал на входе компенсатора помехи $u(n)$ представляет собой задержанный на величину $(\hat{D}_k - L/2)$ опорный сигнал $u_g(n)$, то есть $u(n) = \hat{a}_k u_g(n - \hat{D}_k + L/2)$.

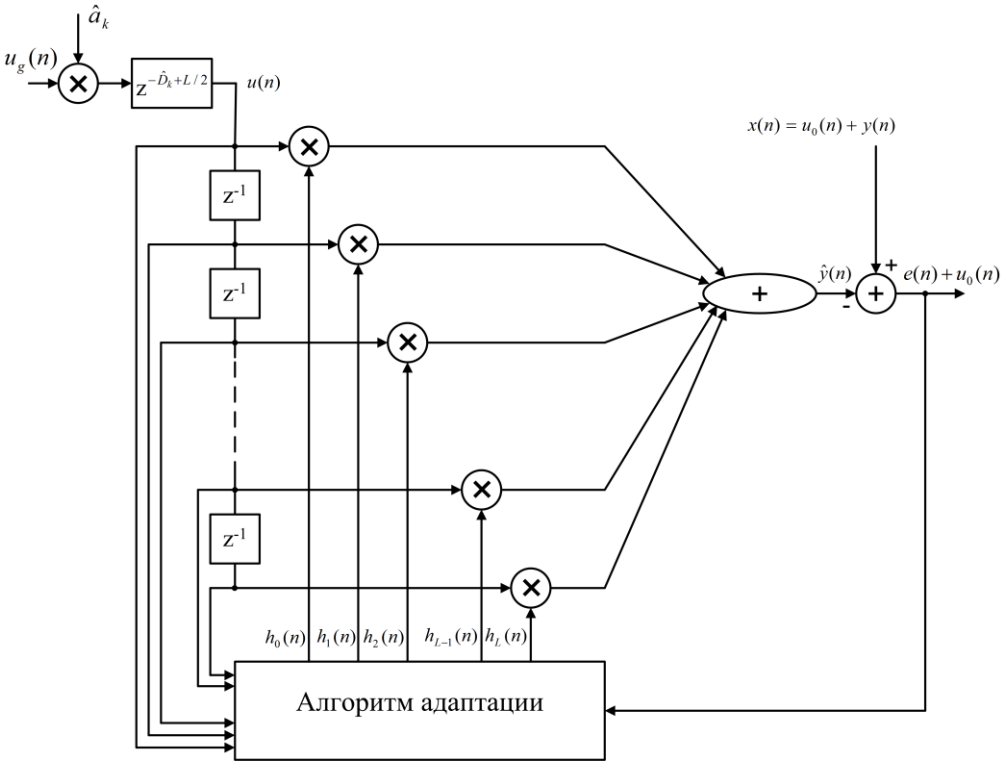


Рис. 1. Схема адаптивной компенсации в одном канале эха

Эхо-сигнал на микрофонном входе имеет при этом вид

$$x(n) = u_0(n) + y(n),$$

где, в целях упрощения, к полезному информационному сигналу $u_0(n)$ отнесены составляющие эха из каналов с другими значениями задержки, а $y(n)$ обозначает только компенсируемую составляющую, которую можно представить в виде [1]

$$y(n) = a_k u_g(n - D_k).$$

Здесь D_k и a_k – соответственно задержка и затухание в $k-$канале эха.

Оценка этой составляющей, формируемой устройством адаптации, представлена на рис. 1 символом $\hat{y}(n)$, где $\hat{y}(n) = a_k u_g(n - D_k) * h_k(n)$, $h_k(n)-$ импульсная функция канала.

Ошибка оценивания

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n).$$

Выходной сигнал схемы сравнения $x(n)-\hat{y}(n)$, усредненный по множеству реализацией, равняется

$$E\left(x(n)-\hat{y}(n)\right)^2 = E\left(u_0(n)+y(n)-\hat{y}(n)\right)^2. \quad (1)$$

Здесь $E-$ символ математического ожидания.

Если учесть, что $u_0(n)$ и $y(n)-\hat{y}(n)$ являются некоррелированными, то выражение (1) можно представить в виде

$$E\left(u_0(n)+y(n)-\hat{y}(n)\right)^2 = E\left(u_0^2\right)+E\left(y(n)-\hat{y}(n)\right)^2,$$

откуда следует, что минимальное значения ошибки $e(n)$ достигается при условии

$$y(n)\approx\hat{y}(n).$$

Сигнал на выходе адаптивного фильтра может быть представлен в виде

$$\hat{y}(n)=\sum_{l=0}^{L}u(n+l)h_l(n)=\mathbf{u}^T(n)\mathbf{h}(n),$$

где $\mathbf{h}(n)=\begin{pmatrix} h_0(n) \\ h_1(n) \\ \vdots \\ h_L(n)\end{pmatrix}$ и $\mathbf{u}(n)=\begin{pmatrix} u(n) \\ u(n-1) \\ \vdots \\ u(n-L)\end{pmatrix}$ – векторы коэффициентов адаптивного фильтра и выборок опорного сигнала $u(n)$, соответственно.

Ошибку обучения можно записать в виде

$$e(n)=x(n)-\mathbf{h}^T(n)\mathbf{u}(n).$$

Следует отметить, что градиент этой ошибки по вектору коэффициентов равен

$$\nabla_h e(n)=-\mathbf{u}(n).$$

В рамках метода наименьших квадратов настройка коэффициентов адаптивного фильтра осуществляется из условия минимума функции потерь

$$Q(n)=\frac{1}{M+1}\sum_{l=0}^{M}\lambda^{2l}e^2(n-l)=\frac{1}{M+1}\sum_{l=0}^{M}\left(\lambda^l x(n-l)-\lambda^l\mathbf{h}^T(n)\mathbf{u}(n-l)\right)^2=$$

$$=\frac{1}{M+1}\left(\mathbf{x}(n)-\mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n)\right)^T\left(\mathbf{x}(n)-\mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n)\right), \quad (2)$$

где параметр λ берется из интервала $0<\lambda\le 1$, вектор $\mathbf{x}(n)=\begin{pmatrix} \lambda^0 x(n) \\ \lambda^1 x(n-1) \\ \vdots \\ \lambda^M x(n-M)\end{pmatrix}$, а матрица $\mathbf{U}(n)=\begin{pmatrix}\lambda^0\mathbf{u}(n) & \lambda^1\mathbf{u}(n-1) & \cdots & \lambda^M\mathbf{u}(n-M)\end{pmatrix}$.

В этих обозначениях минимизация функции потерь (2) приводит к решению, имеющему вид

$$\hat{\mathbf{h}}(n)=\left(\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)\right)^{-1}\mathbf{U}(n)\mathbf{x}(n). \quad (3)$$

Уравнение (3) при значениях $M=L$ и $\lambda=1$ – это уравнение фильтра Винера, определяющее стационарное решение, которое используется при оценке эффективности адаптивных фильтров [1].

Алгоритм адаптации, основанный на функции потерь (2), можно получить, если воспользоваться методом Ньютона [3].

Учитывая, что градиент функции (2) равен $\nabla_h Q(n) = \frac{-2}{M+1}\mathbf{U}(n)\left(\mathbf{x}(n) - \mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n)\right)$, а матрица Гессе – $H_Q(n) = \frac{2}{M+1}\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)$, то искомое уравнение можно записать в виде

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \alpha\left(\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)\right)^{-1}\mathbf{U}(n)\mathbf{e}(n). \quad (4)$$

Здесь коэффициент α выбирается из интервала $(0,1]$, а вектор ошибок задается выражением

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{x}(n) - \mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n).$$

Следует отметить, что матрица произведения $\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)$ размерности $(L+1)\times(L+1)$ является матрицей Грама. Ее компонентами являются скалярные произведения строк матрицы $\mathbf{U}(n)$, размерностью $M+1$. Это означает, что при значении $M < L$ матрица $\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)$ является вырожденной, что исключает возможность применения уравнения (4). В дальнейшем принимается, что $M \geq L$.

При моделировании эхо-сигнал был представлен суммой трех задержанных копий опорного речевого сигнала с задержками в каналах распространения 120, 240 и 360 мс и коэффициентами затухания 0,7, 0,5 и 0,3, соответственно.

Приведенные ниже результаты получены с применением трех адаптивных фильтров 128 порядка. При этом в качестве ошибки при их обучении использовалась суммарная ошибка, заданная выражением

$$e(n) = x(n) - \sum_{k=1}^{r}\mathbf{h}_k^T(n)\mathbf{u}_k(n),$$

где суммирование осуществляется по коэффициентам всех r адаптивных фильтров (в данном случае $r = 3$).

Результаты моделирования работы алгоритма адаптивной компенсации

Моделирование осуществлялось как по формуле (4), так и по ее модификации, полученной из функции потерь

$$Q(n) = \frac{1}{M+1}\sum_{l=0}^{M}\lambda^{2l}e^2(n-l).$$

Результаты настройки коэффициентов фильтров представлены обучающей кривой, приведенной на рис. 2 для размера вектора ошибок $M = 200$. На рис. 2 приведена зависимость отношения ошибки компенсации эха [5] к его максимальному значению на интервале обучения от номера итерации (номера выборки). На рис. 3 и 4 показаны исходный речевой сигнал на фоне эха и восстановленный речевой сигнал.

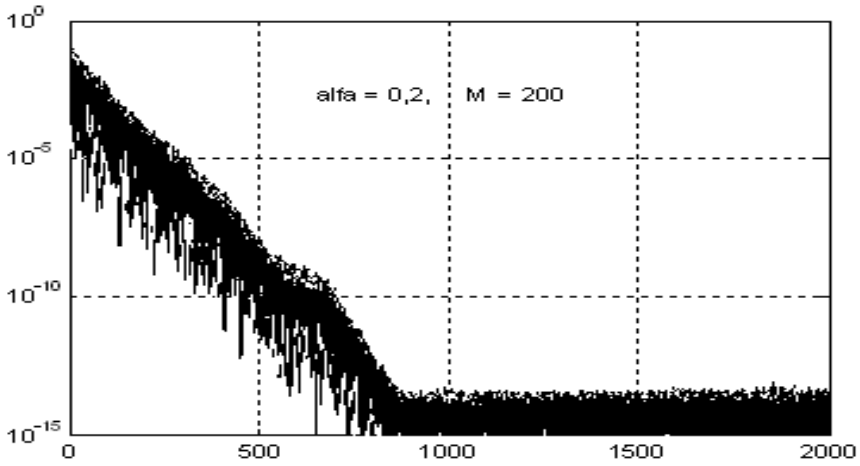


Рис. 2. Кривая настройки коэффициентов фильтров

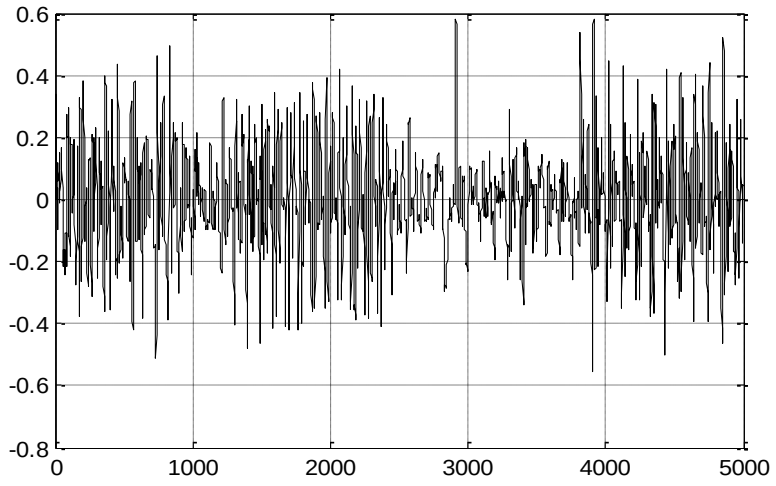


Рис. 3. Фрагмент исходного сигнала на фоне эха

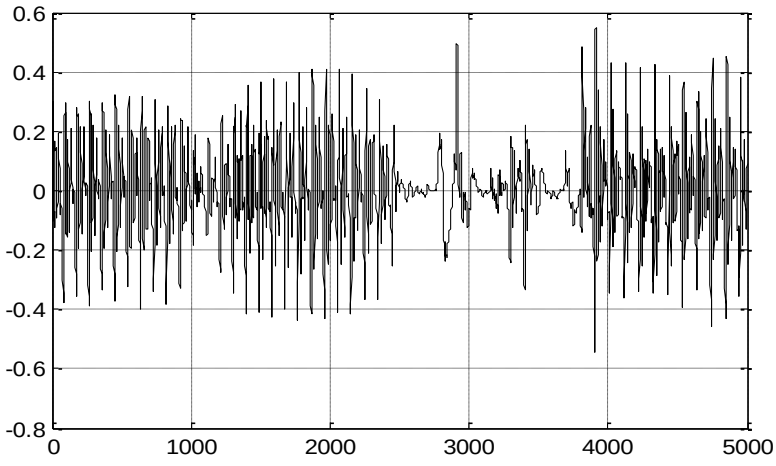


Рис. 4. Фрагмент восстановленного сигнала после компенсации эха

Выводы

Моделирование адаптивного алгоритма компенсации эха с учетом значимых каналов задержки показало его высокую скорость сходимости. Также моделирование показало, что по уровню компенсации и скорости настройки

этот алгоритм имеет лучшие характеристики, чем, например, градиентный алгоритм наискорейшего спуска [3, 6, 7].

Литература

1. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 46-50.

2. Widrow B. and Stearns S. D. Adaptive Signal Processing. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985. 440 p.

3. Breining C. and et al. Acoustic echo control: An application of very-high-order adaptive filters. IEEE Signal Processing Magazine, 1999. No.7. pp. 42 – 69.

4. Cohen I., Benesty J., Cannot S. Speech processing in modern communication. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. - 342 p.

5. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. №1. С. 60-65.

6. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61-63.

7. Кропотов Ю. А. Временной интервал определения закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 6. С. 97-98.

References

1. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. On the correlation estimation of parameters of models of acoustic echo-signals. *Voprosy radiojelektroniki*, 2010, no. 1, pp. 46-50 (In Russian).

2. Widrow B. and Stearns S. D. *Adaptive Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985. – 440 p.

3. Breining C. and et al. Acoustic echo control: An application of very-high-order adaptive filters. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1999, no. 7, pp. 42–69.

4. Cohen I., Benesty J., Cannot S. *Speech processing in modern communication*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. – 342 p.

5. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algoritm podavleniya akusticheskih shumov i sosredotochennyih pomeh s formantnyim raspredeleniem polos rezhektsii [Algorithm of suppression of acoustic noise and the concentrated hindrances with formant band distribution rejection]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60-65 (In Russian).

6. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approksimatsiya zakona raspredeleniya veroyatnosti otschetov signalov akusticheskih pomeh [Approximation of the distribution law of probability of countings of signals of acoustic noise interferences].

Radio and telecommunication systems, 2011, no. 2, pp. 61-63 (In Russian).

7. Kropotov Y. A., Vremennoy interval opredeleniya zakona raspredeleniya veroyatnosti amplitud rechevogo signala [The time interval of a definition the regularity distribution probability amplitudes of speech signals]. *Radiotehnika*, 2006, no. 6, pp. 97-98 (In Russian).

Статья поступила 5 ноября 2015 г.

Информация об авторах

Юрий Анатольевич Кропотов – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)77272. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

Валерий Андреевич Ермолаев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: алгоритмы обработки и передачи акустических сигналов. Тел.: +7(49234)77272. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

Алексей Анатольевич Белов – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7(49234)77272. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

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

Adaptive Algorithm for Echo Compensation in Telecommunications Audio Exchange Systems

Y. A. Kropotov, V. A. Ermolaev, A. A. Belov

Purpose. *The paper deals with a recurrent adaptive echo cancellation for a finite number of samples within a sliding window of data. We consider an adaptive algorithm, built on the basis of the input block adaptive filters. Each filter provides compensation for the echo only in the range of delays, localized in the neighborhood of the maximum delay of the autocorrelation function of the echo. This allows the implementation of such an algorithm with using correlation-extreme method of estimating the parameters of the echo signals. Thus, in this algorithm, echo cancellation can be adaptive filters are applied with a*

reduced number of taps that increases the stability and rate of convergence of such filters. ***Methods.*** *Generalized parametric optimization methods, the method of adaptive echo cancellation, methods of least squares and matrix theory.* ***Results****. This work shown that the above algorithm provides high speed and a high degree of convergence of the echo canceller in the adaptive filter configured in the vicinity of a localized delay.*

Key words: telecommunications systems, audio exchange algorithms compensation echoes multichannel algorithm.

Information about Authors

Yurij Anatolievich Kropotov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Head of Chair «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

Valery Andreevich Ermolaev – 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: algorithms for processing and transmission of acoustic signals. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Alexey Anatolievich Belov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. 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: telecommunications monitoring and forecasting system, information processing. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

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

УДК 62–50:519.7/8

Устойчивость решения оптимизационных задач в условиях неопределенности

Левин В. И.

Актуальность. *Рассматривается задача оптимизации неполностью определенных функций интервального вида, т.е. функций, параметры которых заданы с точностью до интервалов возможных значений. Подчеркнута актуальность проблемы в связи с неполнотой исходных данных в практических задачах. Дан обзор существующих подходов к решению задач оптимизации неполностью определенных функций с различными видами неопределенности. Указаны достоинства и недостатки каждого подхода.* ***Цель статьи.*** *Целью является описание возможности проверки устойчивости решения оптимизационных задач к изменению их параметров.* ***Метод.*** *Приведен предложенный автором метод решения данной задачи путем сведения исходной задачи к двум задачам оптимизации того же типа для полностью определенных функций, т.е. функций с точно известными параметрами. Это так называемый метод детерминизации. Дается необходимая для такого сведения методика сравнения интервальных чисел.* ***Новизна.*** *Новизна работы заключается в том, что в ней впервые показывается возможность единообразного математического моделирования устойчивости решения задачи оптимизации к варьированию ее параметров. Также введены понятия макроустойчивости и микроустойчивости неполностью определенной функции.* ***Результат.*** *Приведен алгоритм проверки макроустойчивости задачи оптимизации полностью определенной функции. Дан простой пример проверки макроустойчивости конкретной задачи оптимизации с помощью этого алгоритма. Для этого примера выбрана известная задача о назначениях. Кроме того, приведен алгоритм проверки микроустойчивости задачи оптимизации полностью определенной функции. С помощью этого алгоритма проверена микроустойчивость некоторой конкретной задачи оптимизации. В качестве математического аппарата в процессе данного исследования использованы методы интервальной математики.*

Ключевые слова: *оптимизация, неопределенность, устойчивость оптимума, варьирование параметров, интервальная математика.*

Введение

Сегодня в мировой науке имеется обширная литература по оптимизации различных систем с детерминированными параметрами – технических, экономических, социальных, политических и т.д. Соответствующие задачи формулируются как задачи математического программирования с целевыми функциями и функциями ограничений, параметры которых являются детерминированными величинами. Однако на практике по объективным причинам чаще встречаются системы с недетерминированными параметрами. Оптимизация таких систем обычно формализуется в виде задач математического программирования с целевыми функциями и функциями ограничений, параметры которых – различные недетерминированные величины: случайные, нечеткие, интервальные и т.д. Эти задачи сложнее детерминированных. Они требуют обобщения понятия экстремума, выяснения условий его существования, связанных с недетерминированностью параметров функции, и разработки специальных методов поиска экстремума функций.

К решению неполностью определенных задач математического программирования есть три различных подхода: детерминированный, вероятностный [1] и интервальный [2]. Детерминированный подход заключается в решении задачи для определенных значений ее параметров, выбранных внутри соответствующих заданных областей неопределенности. Могут, например,

быть выбраны центры (середины) областей неопределенности параметров (центральная стратегия), наихудшее сочетание значений параметров задачи (пессимистическая стратегия), их наилучшее сочетание (оптимистическая стратегия) и т.д. Вероятностный подход заключается в решении задачи для усредненных (ожидаемых, в смысле математического ожидания) значений ее параметров, что предполагает задание вероятностной меры внутри соответствующих областей неопределенности. Оба указанных подхода объединяет предварительная детерминизация параметров задачи, выполняемая перед ее оптимальным решением. В отличие от них, интервальный подход не предполагает детерминизации параметров задачи, которые задаются в интервальной форме – в нем оптимальное решение задачи проводится в ее «естественной форме», т.е. на основе прямого сравнения недетерминированных значений целевой функции, соответствующих различным значениям вектора аргументов, и выборе оптимального (максимального или минимального) значения этой функции. Достоинства и недостатки указанных трех подходов рассмотрены в [1–8].

Изложенные подходы к решению недетерминированных задач математического программирования, при всем их очевидном различии, объединяет одна общая существенная черта. А именно, все они предназначены для решения задач оптимизации, в которых параметры целевых функций и функций ограничений точно не известны. Поэтому мы не можем ограничиться просто отысканием оптимального решения нашей задачи, используя для этого один из упомянутых выше методов. В самом деле, из-за отсутствия при решении задачи точных значений ее параметров может оказаться, что действительные значения параметров задачи несколько отличаются от тех, которые были приняты в процессе отыскания ее решения. В этих условиях, для того чтобы найденное оптимальное решение задачи имело содержательный прикладной смысл, нам нужно, чтобы оно еще обладало следующим свойством: при небольшом варьировании значении параметров решаемой задачи ее оптимальное решение должно по-прежнему существовать. При этом точка, в которой достигается оптимум целевой функции, может переместиться из исходного положения в новое положение, которое, однако, должно быть близко к исходному. Другими словами, требуется, чтобы найденное оптимальное решение неполностью определенной (недетерминированной) задачи математического программирования было устойчивым относительно малых количественных изменений ее параметров.

1. Постановка задачи

Сначала рассмотрим детерминированный случай. Пусть задана следующая непрерывная функция n переменных

$$y = F(x_1,..., x_n), \tag{1}$$

где все параметры (коэффициенты) ее явного представления $p_k, k = \overline{1,l}$, известны точно. Будем рассматривать функцию (1) в ограниченной области, определяемой системой ограничений

$$\Phi_i(x_1,...,x_n) \le b_i, \quad i=\overline{1,m}\},\tag{2}$$

в которой параметры q_s, $s=\overline{1,t}$, явного представления функций ограничений Φ_i и правые части b_i также известны точно.

Тогда относительно указанной выше функции (1) мы можем сформулировать полностью определенную задачу условной оптимизации (задачу математического программирования)

$$F(x_1,...,x_n) = \max,\tag{3}$$

при условии

$$\Phi_i(x_1,...,x_n) \le b_i, i=\overline{1,m}\}.\tag{4}$$

Решением задачи (3), (4) является некоторая точка $x^* = (x_1^*,...,x_n^*)$ (множество точек $M=\{x^*\}$) области (4), в которой целевая функция F достигает максимального значения $F_{\max}$. В современном математическом программировании разработано много различных методов эффективного решения задач вида (3), (4), ориентирующихся на тип целевой функции F и функций ограничений Φ_i, $i=\overline{1,m}$.

Предположим теперь, что в задаче оптимизации (3), (4) параметры явного представления целевой функции F, а также параметры явного представления функций ограничений Φ_i и правые части ограничений b_i известны не точно, а приближенно. Тогда, в соответствии со сказанным в п.1, мы должны совместно с задачей условной оптимизации (3), (4) рассматривать еще одну: проверка устойчивости (неустойчивости) решения задачи (3), (4) относительно небольших количественных изменений ее параметров.

В отличие от существующих методов изучения устойчивости решения задач оптимизации [5], будем рассматривать все возможные количественные изменения каждого параметра задачи как единое целое. Такое рассмотрение позволяет задавать все возможные количественные изменения параметров задач оптимизации в теоретико-множественных терминах. Простейший способ такого задания заключается в том, чтобы задать совокупность указанных изменений параметров задачи в виде соответствующих числовых интервалов. Преимущество такого подхода к изучению устойчивости решения задач оптимизации состоит в том, что в его рамках изучать устойчивость задач оптимизации можно с помощью хорошо разработанных методов интервальной математики [9].

Итак, совместно с полностью определенной задачей условной оптимизации (3), (4) мы должны рассмотреть производную от нее интервальную задачу условной оптимизации

$$\tilde{F}(x_1,...,x_n) = \max,\tag{5}$$

при условии

$$\tilde{\Phi}_i(x_1,...,x_n) \le \tilde{b}_i, i=\overline{1,m}\}.\tag{6}$$

Целевая функция $\tilde{F}$ интервальной задачи оптимизации (5), (6) получается из целевой функции F искомой, полностью определенной задачи оптимизации (3), (4) путем замены ее точно известных параметров p_k, $k=\overline{1,l}$,

соответствующими интервальными параметрами $\tilde{p}_k = [p_{k1}, p_{k2}], k = \overline{1,l}$, которые и определяют интервальную целевую функцию $\tilde{F}$. Аналогично, любая функция ограничений $\tilde{\Phi}_i, i = \overline{1,m}$, интервальной задачи условной оптимизации (5), (6) получается из соответствующей функции $\Phi_i, i = \overline{1,m}$, исходной полностью определенной задачи (3), (4) заменой ее точно известных параметров $q_{si}, s = \overline{1,t}, i = \overline{1,m}$, соответствующими интервальными параметрами $\tilde{q}_{si} = [q_{si1}, q_{si2}], s = \overline{1,t}, i = \overline{1,m}$.

Точно так же интервальные параметры $\tilde{b}_i, i = \overline{1,m}$, в ограничениях интервальной задачи условной оптимизации (5), (6) заменяют собой соответствующие точно известные параметры $b_i, i = \overline{1,m}$ в ограничениях исходной задачи оптимизации (3), (4).

Будем называть полностью определенную задачу условной оптимизации (математического программирования) (3), (4) макроустойчивой, если она имеет решение и, кроме того, имеет решение производная от нее интервальная задача оптимизации (математического программирования) (5), (6).

Далее, будем называть полностью определенную задачу условной оптимизации (математического программирования) (3), (4) микроустойчивой, если она макроустойчива и, сверх того, существует пара решений (x', x''), где $x' = (x'_1, ..., x'_n)$ – некоторая точка решения задачи (3), (4), а $x'' = (x''_1, ..., x''_n)$ – некоторая точка решения задачи (5), (6), расстояние между которыми $D(x', x'')$ не превосходит заданной достаточно малой величины d.

Задача настоящего исследования – разработать алгоритмы определения макро- и микроустойчивости полностью определенных задач условной оптимизации типа (3), (4).

2. Математика сравнения интервалов

В основе решения поставленной задачи – аппарат интервальной математики [9]. В этой математике алгебраические операции над интервальными числами $\tilde{a} = [a_1, a_2], \tilde{b} = [b_1, b_2], ...$ вводятся в виде следующих теоретико-множественных конструкций

$$\begin{aligned} &\tilde{a} + \tilde{b} = \{a + b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \\ &\tilde{a} - \tilde{b} = \{a - b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \\ &k\tilde{a} = \{ka \mid a \in \tilde{a}\} \end{aligned} \tag{7}$$

и т.д. Другими словами, любая операция над интервалами определяется на основе соответствующей операции над точечными величинами, при условии, что конкретные значения величин пробегают все возможные значения из соответствующих интервалов. Из введенных алгебраических операций над интервалами вытекают простые правила выполнения этих операций:

$$[a_1,a_2]+[b_1,b_2]=[a_1+b_1,\ a_2+b_2],\quad [a_1,a_2]-[b_1,b_2]=[a_1-b_2,\ a_2-b_1];$$

$$k[a_1,a_2]=\begin{cases}[ka_1,ka_2],\ k>0,\\ [ka_2,ka_1],\ k<0;\end{cases}\quad [a_1,a_2]\cdot[b_1,b_2]=[\min_{i,j}(a_i\cdot b_j),\max_{i,j}(a_i\cdot b_j)];\ (8)$$

$$[a_1,a_2]/[b_1,b_2]=[a_1.a_2]\cdot[1/b_2,1/b_1].$$

Итак, введем операции сравнения интервальных чисел [2, 8]. Попытаемся сравнить два интервала $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$, рассматривая их как интервальные числа. Естественно начать со сравнения интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ на базе сравнений в отдельных парах вещественных чисел (a_i,b_j), где $a_i\in\tilde{a}, b_i\in\tilde{b}$. Но это ведет к провалу, так как в общем случае одни пары чисел (a_i,b_j) будут находиться в отношении $a_i>b_j$, а другие – в противоположном отношении: $a_i<b_j$. Поэтому единственное, что остается – реализовать операцию сравнения интервалов на теоретико-множественном уровне, подобно алгебраическим операциям над интервалами (7). В соответствии со сказанным, введем операции взятия максимума $\vee$ и минимума $\wedge$ двух интервальных чисел $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$ в виде теоретико-множественных конструкций

$$\tilde{a}\vee\tilde{b}=\{a\vee b\,|\,a\in\tilde{a},b\in\tilde{b}\},\ \tilde{a}\wedge\tilde{b}=\{a\wedge b\,|\,a\in\tilde{a},b\in\tilde{b}\}.\qquad (9)$$

Операция взятия максимума (минимума) из двух интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$, согласно определениям (9), определяется как нахождение максимума (минимума) из двух точечных величин a и b, при условии, что конкретные значения этих величин пробегают все возможные значения соответственно из интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$. 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) результатом этих операций был один из операндов $\tilde{a}$ или $\tilde{b}$, 3) операции $\vee,\wedge$ являлись согласованными, т.е. было истинно условие: если большим (меньшим) является один из интервалов $\tilde{a},\tilde{b}$, то меньшим (большим) является другой из них. Условие сравнимости величин двух интервалов является, очевидно, необходимым и достаточным условием. Однако легко доказать, что условие согласованности операций $\vee$ и $\wedge$ над интервалами выполняется всегда (для любой пары интервалов $(\tilde{a},\tilde{b})$). Также всегда (для любой пары интервалов) выполняется условие существования введенных нами выше операций взятия максимума $\vee$ и минимума $\wedge$ двух интервалов, причем результатом операции оказывается некоторый новый интервал. В итоге необходимое и достаточное условие сравнимости двух интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ превращается в условие, по которому операции $\tilde{a}\vee\tilde{b}$ и $\tilde{a}\wedge\tilde{b}$ должны давать в результате обязательно один из интервалов-операндов: $\tilde{a}$ или $\tilde{b}$. Такая формулировка условия сравнимости интервалов дает возможность получения его в конструктивной форме, пригодной еще и для практического использования. Базовая форма условия здесь такова.

Теорема 1. Для сравнимости двух интервалов $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$ и их нахождения между собой в отношении $\tilde{a}\geq\tilde{b}$ необходимо и достаточно, чтобы одноименные границы этих интервалов удовлетворяли условиям

$$a_1\geq b_1,\quad a_2\geq b_2, \tag{10}$$

а для их сравнимости и нахождения между собой в отношении $\tilde{a}\leq\tilde{b}$ – чтобы удовлетворялись условия

$$a_1\leq b_1,\quad a_2\leq b_2. \tag{11}$$

По теореме 1, интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ сравнимы и находятся в определенном отношении $\tilde{a}\geq\tilde{b}$ или $\tilde{a}\leq\tilde{b}$ только когда в таком же отношении находятся их одноименные границы a_1,b_1 и a_2,b_2. Другими словами, для сравнимости интервалов меньший интервал должен быть сдвинут обеими границами влево относительно большего интервала. Так что с помощью теоремы 1 сравнение двух интервалов и выбор большего (меньшего) из этих интервалов сводится к сравнению одноименных границ этих интервалов, являющихся вещественными числами. **Доказательство** теоремы 1 см. в [2, 8, 13].

Теорема 2. Для несравнимости двух интервалов $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$, иными словами, для того, чтобы они не находились ни в отношении $\tilde{a}\geq\tilde{b}$, ни в $\tilde{a}\leq\tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы одноименные границы интервалов удовлетворяли условиям

$$a_1<b_1,\, a_2>b_2 \quad \text{или} \quad b_1<a_1,\, b_2>a_2. \tag{12}$$

Условия (12) дают ситуацию, когда один интервал на числовой оси полностью «накрывает» другой. **Доказательство** теоремы 2 см. в [2, 8, 13].

Теорема 2 показывает существование случаев несравнимости интервалов. Несравнимость величин некоторых интервалов – естественное следствие того, что, в отличие от точно известных вещественных, интервальные числа задаются с некоторой неопределенностью (точно известно, что вещественное число принимает некоторое значение в заданном интервале, но не известно, какое именно это значение).

Далее, теоремы 1 и 2, посвященные сравнению пар интервалов, можно обобщить на системы с произвольным числом интервалов.

Теорема 3. Для существования максимального интервала в системе интервалов $\tilde{a}(1)=[a_1(1),a_2(1)],\ \tilde{a}(2)=[a_1(2),a_2(2)],\ldots$ необходимо и достаточно, чтобы его границы были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно следующим условиям

$$a_1(1)\geq a_1(2),\ a_1(1)\geq a_1(3),\ldots;\quad a_2(1)\geq a_2(2),\ a_2(1)\geq a_2(3),\ldots \tag{13}$$

Условия (13) записаны для того случая, когда максимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что не ограничивает общности.

Теорема 4. Для существования минимального интервала в системе из интервалов $\tilde{a}(1)=[a_1(1),a_2(1)],\ \tilde{a}(2)=[a_1(2),a_2(2)],\ldots$ необходимо и достаточно, чтобы его границы располагались относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$a_1(1)\leq a_1(2),\ a_1(1)\leq a_1(3),\ldots;\quad a_2(1)\leq a_2(2),\ a_2(1)\leq a_2(3),\ldots \tag{14}$$

Условия (14), аналогично условиям (13), записаны для случая, когда минимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что не ограничивает общности.

Теоремы 3, 4 говорят, что интервал является максимальным (минимальным) в системе только если максимальны (минимальны) его нижняя граница – среди нижних границ всех интервалов – и верхняя граница – среди верхних границ всех интервалов. **Доказательство** теорем 3 и 4 в [2, 8, 13].

3. Макроустойчивость задачи условной оптимизации

Обратимся теперь к полностью определенной задаче условной оптимизации (3), (4). Опишем метод установления ее макроустойчивости.

Полностью определенная задача условной оптимизации (3), (4) по определению (см. п. 1) является макроустойчивой, если она сама и производная от нее интервальная задача условной оптимизации (5), (6) имеют решения. Существование решения полностью определенной задачи условной оптимизации (3), (4) можно установить с помощью общеизвестных методов математического программирования [10–12], так что здесь нет никаких проблем. Сложнее, однако, обстоит дело с проверкой существования решения интервальной задачи условной оптимизации (5), (6). В этом случае эффективным оказывается применение детерминизационного метода решения задач интервальной оптимизации [2, 8, 13].

Интервальная задача условной оптимизации (5), (6) имеет интервальную целевую функцию $\tilde{F}(x_1,..., x_n)$, интервальные функции ограничений $\tilde{\Phi}_i, \overline{1,m}$ в левых частях ограничений и интервальные параметры $\tilde{b}_i, i=\overline{1,m}$ в правых частях. Используя формулы элементарных преобразований интервалов (8), функции $\tilde{F}$, $\tilde{\Phi}_i$ можно представить явно в интервальной форме. Так же можно представить и параметры $\tilde{b}_i$. Все эти представления записываются в виде

$$\begin{aligned}
&\tilde{F}(x_1,..., x_n)=[F_1(x_1,..., x_n), F_2(x_1,..., x_n)],\\
&\tilde{\Phi}_i(x_1,..., x_n)=[\Phi_{i1}(x_1,..., x_n), \Phi_{i2}(x_1,..., x_n)], \quad i=\overline{1,m},\\
&\tilde{b}_i=[b_{i1}, b_{i2}], \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad i=\overline{1,m}.
\end{aligned} \tag{15}$$

Алгоритм получения представлений (15) покажем на примере общей задачи оптимизации типа (5), (6).

Пример 1. Рассмотрим частный случай интервальной задачи оптимизации (5), (6) – интервальную задачу линейного программирования

$$\begin{aligned}
&\tilde{c}_1x_1+...+\tilde{c}_nx_n=\max,\\
&\tilde{a}_{i1}x_1+...+\tilde{a}_{in}x_n\le\tilde{b}_i,\ i=\overline{1,m}.\\
&x_1\ge 0,..., x_n\ge 0.\\
&\tilde{c}_j=[c_{j1}, c_{j2}],\ j=\overline{1,n};\quad \tilde{a}_{ij}=[a_{ij,1}, a_{ij,2}],\ i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n};\quad \tilde{b}_i=[b_{i1}, b_{i2}].
\end{aligned}$$

Здесь интервальная целевая функция $\tilde{F}(x_1,..., x_n)=\tilde{c}_1x_1+...+\tilde{c}_nx_n$, интервальные функции ограничений $\tilde{\Phi}_i(x_1,..., x_n)=\tilde{a}_{i1}x_1+...+\tilde{a}_{in}x_n, i=\overline{1,m}$, и интервальные параметры $\tilde{b}_i$ в правых частях: $\tilde{b}_i=[b_{i1}, b_{i2}]$.

Подставляя в выражения функций $\tilde{F}, \tilde{\Phi}_i$ параметры $\tilde{c}_j, \tilde{a}_{ij}$ в явной форме интервалов и умножая интервалы на неотрицательные переменные $x_1,..., x_n$,

согласно формуле (8), получим необходимые явные интервальные представления (15) для рассматриваемой нами задачи линейного программирования

$$\tilde{F}(x_1,...,x_n)=[F_1(x_1,...,x_n)=\tilde{c}_{11}x_1+...+\tilde{c}_{n1}x_n, F_2(x_1,...,x_n)=\tilde{c}_{12}x_1+...+\tilde{c}_{n2}x_n],$$
$$\tilde{\Phi}_i(x_1,...,x_n)=[\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)=\tilde{a}_{i1,1}x_1+...+\tilde{a}_{in,1}x_n, \Phi_{i2}(x_1,...,x_n)=\tilde{a}_{i1,2}x_1+...+\tilde{a}_{in,2}x_n],\ i=\overline{1,m},$$
$$\tilde{b}_i=[b_{i1},b_{i2}],\ i=\overline{1,m}.$$

Всю задачу оптимизации (5), (6) после этого можно переписать в явном интервальном виде

$$[F_1(x_1,...,x_n), F_2(x_1,...,x_n)]=\max, \tag{16}$$

$$[\Phi_{i1}(x_1,...,x_n), \Phi_{i2}(x_1,...,x_n)]\le[b_{i1},b_{i2}],\quad i=\overline{1,m}\} \tag{17}$$

Согласно представлению (16), (17), задача (5), (6) заключается в том, чтобы найти максимум интервальной функции в области, ограниченной системой интервальных неравенств.

От интервального представления задачи (16), (17) можно перейти к эквивалентному представлению в виде пары полностью определенных (детерминированных) задач условной оптимизации, которое уже поддается решению. Для этого сначала по теореме 3 представим интервальное уравнение (16) в виде эквивалентной пары детерминированных уравнений

$$F_1(x_1,...,x_n)=\max,\quad F_2(x_1,...,x_n)=\max. \tag{18}$$

Далее, по теореме 1 представим систему интервальных неравенств (17) в виде эквивалентной системы обычных детерминированных неравенств

$$\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)\le b_{i1},\ \Phi_{i2}(x_1,...,x_n)\le b_{i2},\quad i=\overline{1,m}. \tag{19}$$

Соединив пару уравнений (18) с системой неравенств-ограничений (19), мы получим совокупность двух полностью определенных (детерминированных) задач условной оптимизации вида (3), (4)

$$F_1(x_1,...,x_n)=\max,$$
$$\left.\begin{aligned}&\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)\le b_{i1},\ i=\overline{1,m},\\&\Phi_{i2}(x_1,...,x_n)\le b_{i2},\ i=\overline{1,m},\end{aligned}\right\} \tag{20}$$

$$F_2(x_1,...,x_n)=\max,$$
$$\left.\begin{aligned}&\Phi_{i1}(x_1,...,x_n)\le b_{i1},\ i=\overline{1,m},\\&\Phi_{i2}(x_1,...,x_n)\le b_{i2},\ i=\overline{1,m},\end{aligned}\right\} \tag{21}$$

эквивалентную исходной интервальной задаче условной оптимизации (5), (6). Задачу (20) назовем нижней граничной задачей исходной интервальной задачи (5), (6), а задачу (21) – ее верхней граничной задачей.

Итак, для получения решения интервальной задачи (5), (6) нужно решить ее нижнюю (20) и верхнюю (21) граничные задачи. В общем случае полное решение нижней граничной задачи имеет вид $\{M_{\text{н}}(x), F_{1,\max}\}$, а верхней граничной задачи – вид $\{M_{\text{в}}(x), F_{2,\max}\}$.

Здесь $M_{\text{н}}(x), M_{\text{в}}(x)$ – множества точек решения $x=(x_1,...,x_n)$ нижней и верхней граничных задач, а $F_{1,\max}$, $F_{2,\max}$ – полученные максимальные значения

целевых функций этих задач. Решение интервальной задачи (5), (6) формируется из решений ее нижней и верхней граничных задач и имеет вид

$$\begin{array}{l}\{x^* \in M_{\text{н}}(x) \cap M_{\text{в}}(x); \\ \tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]\ \}.\end{array} \qquad (22)$$

Согласно (22), в качестве точки решения x^* интервальной задачи оптимизации (5), (6) выбирается любая точка из пересечения множеств точек решения ее нижней и верхней граничных задач, а в качестве максимального значения интервальной целевой функции $\tilde{F}_{\max}$ – интервал от максимального значения целевой функции нижней задачи $F_{1,\max}$ до максимального значения целевой функции верхней задачи $F_{2,\max}$.

Из выполненного процесса построения решения интервальной задачи условной оптимизации вида (5), (6) и определения макроустойчивости полностью определенной задачи условной оптимизации (3), (4) вытекает следующая основная теорема.

Теорема 5. Для того чтобы полностью определенная задача условной оптимизации (3), (4) была макроустойчива, необходимо и достаточно, чтобы: 1) эта задача имела решение; 2) интервальная задача условной оптимизации (5), (6), производная от детерминированной задачи (3), (4), имела нижнюю и верхнюю граничные задачи, обладающие решениями; 3) множества решений нижней и верхней граничных задач интервальной задачи оптимизации (5), (6) пересекались.

Сформулированная выше теорема 5 дает следующий алгоритм для проверки произвольной полностью определенной (детерминированной) задачи условной оптимизации (3), (4) на макроустойчивость.

Шаг 1. Используя подходящие известные методы решения полностью определенных (детерминированных) задач условной оптимизации [10–12], ищем решение $x' = (x'_1,..., x'_n)$ задачи (3), (4). Одновременно проверяем существование (несуществование) решения этой задачи.

Шаг 2. Задаваясь некоторыми подходящими значениями интервальных параметров целевой функции F, функций ограничений $\Phi_i, i = \overline{1,m}$, и правых частей ограничений $b_i, i = \overline{1,m}$ в полностью определенной задаче условной оптимизации (3), (4), строим производную от нее интервальную задачу условной оптимизации (5), (6).

Шаг 3. Используя законы интервальной математики (8), выражающие результаты элементарных преобразований интервалов, представляем целевую функцию $\tilde{F}$, функции ограничений $\tilde{\Phi}_i, i = \overline{1,m}$, а также правые части ограничений $\tilde{b}_i, i = \overline{1,m}$, интервальной задачи условной оптимизации (5), (6) в интервальной форме (15).

Шаг 4. Используя полученные на шаге 3 интервальные представления функций $\tilde{F}, \tilde{\Phi}_i, i = \overline{1,m}$, и параметров $\tilde{b}_i, i = \overline{1,m}$, формируем нижнюю (20) и верхнюю (21) граничные задачи интервальной задачи оптимизации (5), (6).

Шаг 5. Используя те же методы, что и на шаге 1, ищем решения задач (20) и (21). Одновременно проверяем существование или несуществование решений этих задач. Полные решения задач имеют соответственно форму $\{M_{\text{н}}(x), F_{1,\max}\}, \{M_{\text{в}}(x), F_{2,\max}\}$, где $M_{\text{н}}(x)$ – множество точек x решения нижней, $M_{\text{в}}(x)$ – множество точек x решения верхней граничной задачи.

Шаг 6. Проверяется наличие или отсутствие пересечения найденных в результате решения задач (20) и (21) множеств $M_{\text{н}}(x), M_{\text{в}}(x)$.

Итог. Если в результате работы указанного алгоритма выяснилось, что полностью определенная задача условной оптимизации (3), (4) имеет решение, а производная от нее интервальная задача (5), (6) имеет нижнюю и верхнюю граничные задачи, обладающие решениями, причем множества этих решений пересекаются, то задача оптимизации (3), (4) является макроустойчивой. В противном случае задача (3), (4) не макроустойчива.

Пример 2 (задача о назначениях). Есть три работы и три исполнителя, заданы доходы a_{ij} от выполнения любой j-й работы любым i-м $(i, j = \overline{1,3})$ исполнителем. Требуется распределить работы между исполнителями так, чтобы каждый из них выполнял ровно одну работу, и, кроме этого, суммарный доход от выполнения всех работ был максимален. Введя множество неизвестных матриц назначений $X = \|x_{ij}\|, x_{ij} \in \{0,1\}$, причем $x_{ij} = 1$, если i-й исполнитель делает j-ю работу, и $x_{ij} = 0$ в противном случае, задачу можно записать математически в виде

$$F(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} a_{ij}x_{ij} = \max, \text{ при условии}$$

$$\Phi_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} x_{ij} = 1,\ j = \overline{1,3};\ \Phi_2(x_{ij}) \equiv \sum_{j=1}^{3} x_{ij} = 1,\ i = \overline{1,3}.$$

Видим, что наша задача – частный случай полностью определенной задачи условной оптимизации (3), (4). Проверим задачу на макроустойчивость, используя изложенный алгоритм.

Шаг 1. Для определенности конкретизируем матрицу $A = \|a_{ij}\|$ в виде матрицы с точно известными параметрами

$$A = \begin{Vmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 3 \\ 3 & 4 & 4 \end{Vmatrix}$$

и решим нашу задачу при этих условиях. Имеется шесть различных матриц назначений X, удовлетворяющих ограничениям задачи:

$$X_1 = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix},\quad X_2 = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix},$$

$$X_3 = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix},\quad X_4 = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix},$$

$$X_5 = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{Vmatrix},\quad X_6 = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{Vmatrix},$$

которым соответствуют значения целевой функции оптимизационной задачи:

$F_1 = 9, F_2 = 10, F_3 = 11, F_4 = 11, F_5 = 9, F_6 = 10$. Так что решение задачи существует, достигается на матрицах назначений X_3, X_4 и равно

$$F_{\max} = F_{X_3, X_4} = 11.$$

Шаг 2. Согласно описанию данного шага алгоритма (см. выше), задаемся подходящими значениями интервальных параметров целевой функции F нашей недетерминированной задачи о назначениях в виде заданной неполностью (с точностью до интервалов возможных значений) матрицы доходов $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\| = \|[a_{1ij}, a_{2ij}]\|$:

$$\tilde{A} = [A_1, A_2], \quad \text{где} \quad A_1 = \|\tilde{a}_{1ij}\| = \begin{Vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{Vmatrix}, \; A_2 = \|\tilde{a}_{2ij}\| = \begin{Vmatrix} 3 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 4 \\ 4 & 5 & 5 \end{Vmatrix}.$$

Имеем производную от решенной полностью определенной задачи условной оптимизации интервальную задачу оптимизации типа (5), (6)

$$\tilde{F}(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} \tilde{a}_{ij} x_{ij} = \max,$$

при тех же самых условиях-ограничениях, которые существовали и для детерминированной задачи условной оптимизации.

Шаг 3. С помощью формул (8) элементарных преобразований интервалов представляем целевую функцию производной задачи $\tilde{F}$ в явной интервальной форме (15)

$$\tilde{F}(x_{ij}) = \left[F_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} a_{1ij} x_{ij}, \; F_2(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} a_{2ij} x_{ij} \right].$$

Шаг 4. По найденному на шаге 3 интервальному представлению целевой функции $\tilde{F}$ и заданным условиям-ограничениям мы с формируем нижнюю (20) и верхнюю (21) граничные задачи интервальной задачи

$$\left. \begin{array}{l} F_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} a_{1ij} x_{ij} = \max, \text{ при условии} \\ \Phi_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} x_{ij} = 1, \; j = \overline{1,3}; \; \Phi_2(x_{ij}) \equiv \sum_{j=1}^{3} x_{ij} = 1, \; i = \overline{1,3} \end{array} \right\};$$

$$\left. \begin{array}{l} F_2(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} a_{2ij} x_{ij} = \max, \\ \text{при тех же самых условиях} \end{array} \right\}.$$

Шаг 5. Тем же методом, что и на шаге 1, находим решения нижней и верхней граничных задач. В нашем случае решение нижней граничной задачи существует, достигается на матрицах назначений X_1, X_2, X_3, X_4 и равно $F_{1,\max} = F_{1(X_1, X_2 . X_3, X_4)} = 5$. Решение верхней граничной задачи тоже существует, достигается на матрицах X_3, X_4 и принимает значение $F_{2,\max} = F_{1(X_3, X_4)} = 14$.

Шаг 6. Проверяем наличие пересечения множеств точек решения нижней и верхней граничных задач интервальной задачи

$$M_H \cap M_B = \{X_1, X_2, X_3, X_4\} \cap \{X_3, X_4\} = \{X_3, X_4\} \neq \varnothing,$$

т.е. пересечение непусто.

Итог. Исходная полностью определенная задача условной оптимизации типа (3), (4) имеет решение. Производная интервальная задача (5), (6) имеет нижнюю и верхнюю граничные задачи, обладающие решениями, причем множества точек решения этих задач пересекаются. Таким образом, полностью определенная задача условной оптимизации типа (3), (4) является макроустойчивой.

4. Микроустойчивость задачи условной оптимизации

Снова обратимся к полностью определенной задаче условной оптимизации (3), (4). Опишем метод установления микроустойчивости задачи.

Полностью определенная задача условной оптимизации (3), (4) согласно определению (п. 1) является микроустойчивой, если она макроустойчива и, кроме того, существует пара решений (x', x''), где $x' = (x'_1,..., x'_n)$ – некоторое решение задачи (3), (4), а $x'' = (x''_1,..., x''_n)$ – некоторое решение производной от нее интервальной задачи условной оптимизации (5), (6), расстояние между которыми $D(x', x'')$ не превосходит заданной достаточно малой величины d. Из этого определения напрямую вытекает следующий алгоритм проверки произвольной полностью определенной задачи условной оптимизации (3), (4) на микроустойчивость.

Шаг 1. С помощью 6-шагового алгоритма, указанного в п. 3, проверяем задачу (3), (4) на макроустойчивость. В случае отрицательного результата проверки (задача (3), (4) не макроустойчива) конец алгоритма, с выводом: задача (3), (4) не является микроустойчивой. В случае положительного результата проверки (задача (3), (4) макроустойчива) переход к шагу 2.

Шаг 2. Выбираем точку решения $x' = (x'_1,..., x'_n)$ задачи (3), (4), найденную на шаге 1. Добавляем к ней какую-нибудь точку решения $x'' = (x''_1,..., x''_n)$ интервальной задачи (5), (6), также найденную на шаге 1. В результате получаем пару решений (x', x'') указанных двух задач.

Шаг 3. Вычисляем расстояние $D(x', x'')$ между точками решения x', x'' указанных двух задач, используя для этого формулу

$$D(x', x'') = \sqrt{(x'_1 - x''_1)^2 + ... + (x'_n - x''_n)^2}\ . \tag{23}$$

Шаг 4. Проверяем выполнение неравенства, сравнивающего расстояние $D(x', x'')$ с заданной достаточно малой величиной d:

$$D(x', x'') \le d\ , \tag{24}$$

Если условие (24) выполнено, задача оптимизации (3), (4) объявляется микроустойчивой и конец алгоритма. В противном случае совершается переход к шагу 2, в котором теперь к точке решения $x' = (x'_1,..., x'_n)$ задачи (3), (4), найденной на шаге 1, добавляется какая-то другая точка решения $x'' = (x''_1,..., x''_n)$ задачи (5), (6) из числа точек, найденных на шаге 1. В результате получаем новую пару решений (x', x'') и т.д.

Итог. Если в результате работы алгоритма после некоторого достаточного числа шагов получена пара решений (x', x''), удовлетворяющая неравенству (24), выполнение останавливается и задача (3), (4) объявляется микроустойчивой. В противном случае процедура также останавливается, а задача (3), (4) признается не обладающей свойством микроустойчивости.

Заключение

В данной статье показано, что проблема оптимизации неполностью определенных функций не может ограничиться лишь отысканием точки оптимума и значения в ней нашей функции, но и должна включать в себя задачу определения устойчивости найденного оптимума. Последнее означает, что при небольшом варьировании параметров оптимизируемой функции ее оптимум должен по-прежнему существовать и находиться в точке, близкой к точке исходного оптимума. Для установления устойчивости оптимума неполностью определенных функций предложена специальная эффективная методика, основанная на аппарате интервальной математики.

Литература

1. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством. М.: Наука, 1975. 616 с.

2. Левин В. И. Интервальное дискретное программирование // Кибернетика и системный анализ. 1994. № 6. С. 92–103.

3. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function // Control and Cybernetics, 1980. Vol. 9. № 4. P. 189–202.

4. Тимохин С. Г., Шапкин А. В. О задачах линейного программирования в условиях неточных данных // Экономика и математические методы. 1981. Том 17. № 5. С. 955–963.

5. Рощин В. А. Семенова Н. В., Сергиенко И. В. Вопросы решения и исследования одного класса задач неточного целочисленного программирования // Кибернетика. 1989. № 2. С. 42–46.

6. Семенова Н. В. Решение одной задачи обобщенного целочисленного программирования // Кибернетика. 1984. № 5. С. 25–31.

7. Вощинин А. П., Сотиров Г. Р. Оптимизация в условиях неопределенности. М.: Изд-во МЭИ, 1989. 224 с.

8. Левин В. И. Интервальные методы оптимизации систем в условиях неопределенности. Пенза: Изд-во Пензенского технологического института, 1999. 95 с.

9. Алефельд Г, Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987. 360 с.

10. Юдин Д. Б., Гольдштейн Е. Г. Задачи и методы линейного программирования. М.: Советское радио, 1964. 350 с.

11. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 280 с.

12. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. М.: Наука, 1987. 304 с.

13. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях интервальной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1992. № 7. С. 97–106.

14. Левин В. И. Нелинейная оптимизация в условиях интервальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. 1999. № 2. С. 138–146.

15. Шашихин В. Н. Оптимизация интервальных систем // Автоматика и телемеханика. 2000. № 11. С. 94–103.

16. Ащепков Л. Т., Давыдов Д. В. Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления. М.: Наука, 2006. 285 с.

17. Островский Г. М, Волин Ю. М. Технические системы в условиях неопределенности. Анализ гибкости и оптимизация. М.: Бином, 2008. 325 с.

18. Островский Г. М., Зиятдинов Н. Н., Лаптева Т. В. Оптимизация технических систем. М.: Кнорус, 2012. 252 с.

19. Tsoukias A., Vincke P. A Characterization of PQI Interval Orders // Discrete Applied Mathematics. 2003. № 127 (2). P. 387–397.

20. Давыдов Д. В. Идентификация параметров линейных интервальных управляемых систем с интервальным наблюдением // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2008. № 6. С. 25–29.

21. Ozturk M., Tsoukias A. Positive and Negative Reasons in the Interval Comparisons // Proc. of 15th Intern. Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU-2004). 2004. P. 983–989.

22. Шашихин В. Н. Решение интервальной матричной игры в смешанных стратегиях // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 5. С. 97–104.

23. Левин В. И. Сравнение интервальных чисел и оптимизация систем с интервальными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2004. Т. 65. № 4. С. 625–633.

24. Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации // Автоматика и вычислительная техника. 2012. Т. 46. № 4. С. 17–25.

25. Левин В. И. Алгоритм оптимизации в условиях неопределенности с помощью детерминизации // Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления. 2014. Т. 1. № 5. С. 6–27.

26. Левин В. И. Интервальный подход к оптимизации в условиях неопределенности // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 123–141.

References

1. Pervozvanskiy A. A. *Matematicheskie modeli v upravlenii proizvod-stvom* [Mathematical Models in Production Management]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 616 p (in Russian).

2. Levin V. I. Interval Discrete Programming. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1994, vol. 30, no. 6, pp. 866–874 (in Ukraine).

3. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function. *Control and Cybernetics*, 1980, vol. 9, no 4, pp. 189–202.

4. Timokhin S. G., Shapkin A. V. O zadachakh lineinogo programmirovaniya v usloviiakh netochnykh dannykh [About Linear Programming Problems in Terms of Imperfect Data]. *Economics and mathematical methods*, 1981, no. 5, 955 p (in Russian).

5. Roshchin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Solution and Investigation of One Class of Inexact Integer Programming Problems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 185–193(in Ukraine).

6. Semenova N. V. Solution of a Generalized Integer-Valued Programming Problem. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1984, vol. 20, no. 5, pp. 641–651(in Ukraine).

7. Voshchinin A. P., Sotirov G. R. *Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti* [Optimization under uncertainty]. Moscow, MEI Publ., 1989, 224 p (in Russian).

8. Levin V. I. *Intervalnye metody optimizacii system v usloviyah neopredelennosti* [Interval Methods of System Optimization in Condition of Uncertainty]. Penza, Penza Technological Institute Publ., 1999, 95 p (in Russian).

9. Alefeld G., Herzberger Ju., Zürich B.I. *Einführung in die Intervallrechnung* [Introduction to the Interval Computations], Wissenschaftsverlag, 1974, 398 p [in German].

10. Yudin D. B, Gol'dshtein E. G. *Zadachi i metody lineinogo programmirovaniya* [Tasks and Methods of Linear Programming]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964, 735 p (in Russian).

11. Korbut A.A., Finkel'shtein Yu.Yu. *Diskretnoe programmirovanie* [Discrete Programming]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 280 p (in Russian).

12. Levin V. I. *Strukturno-logicheskie metody issledovaniia slozhnykh sistem s primeneniem EVM* [Structural-Logical Research Methods of Complex Systems Using Computer]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 304 p (in Russian).

13. Levin V. I. Discrete Optimization under Interval Uncertainty. *Automation and Remote Control*, 1992, vol. 53, no 7, pp 1039–1047.

14. Levin V. I. Nonlinear Optimization under Interval Uncertainty. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1999, vol. 35, no. 2, pp. 297–306 (in Ukraine).

15. Shashikhin V. N. Optimization of Interval Systems. *Automation and Remote Control*, 2000, vol. 61, no. 11, pp. 1843–1851.

16. Ashchepkov L. T., Davydov D. V. *Universal'nye resheniia interval'nykh zadach optimizatsii i upravleniia* [Universal Solutions of Interval Problems of Optimization and Control]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 285 p (in Russian).

17. Ostrovskiy G. M., Volin Yu. M. *Tekhnicheskie sistemy v usloviyakh neopredelennosti. Analiz gibkosti i optimizatsiia* [Technical Systems in Conditions of Uncertainty. Analysis of Flexibility and Optimization]. Moscow, Binom Publ., 2008, 325 p (in Russian).

18. Ostrovskiy G. M., Ziiatdinov N. N., Lapteva T. V. *Optimizatsiia tekhnicheskikh system* [Optimization of Technical Systems]. Moscow, Knorus Publ., 2012, 252 p (in Russian).

19. Tsoukias A., Vincke P. A Characterization of PQI Interval Orders. *Discrete Applied Mathematics*, 2003, no. 127 (2), pp. 387–397.

20. Davydov D. V. Identification of Parameters of Linear Interval Controllable Systems with the Interval Observation. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, vol. 47, no. 6, pp. 861–865.

21. Ozturk M., Tsoukias A. Positive and Negative Reasons in the Interval Comparisons. *Proc. of 15th Intern. Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU-2004)*, 2004, pp. 983–989.

22. Shashikhin V. N. A Mixed Strategy Solution of an Interval Matrix Game. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2001, vol. 40, no. 5, pp. 770–777.

23. Levin V. I. Comparison of Interval Numbers and Optimization in Interval-Parameter Systems, *Automation and Remote Control*, 2004, vol. 65, no. 4, pp. 625–633.

24. 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.

25. Levin V. I. Algoritm optimizacii v usloviyah neopredelennosti s pomoschyu determinizacii [Algorithm of Optimization in Condition of Uncertainty by Determination]. *Evristicheskie algoritmy i raspredelennye vychisleniya*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 6–27 [in Russian].

26. Levin V. I. Intervalniy podhod k optimizacii v usloviyah neopredelennosti [Interval Approach to Optimization with Uncertainty]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no 4, pp. 123–141 [in Russian].

Информация об авторе

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(8412)670-263. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

Stability of Solution of Optimization Problems in Condition of Uncertainty

V. I. Levin

Relevance. *Here the problem of optimization of incompletely specified functions of interval kind, i.e., functions, whose parameters are defined up to an interval of possible values, is considered. Actuality of problem in connection with incompleteness of data in practical tasks is underlined. A review of existing approaches to solving optimization problems of incompletely defined functions with different types of uncertainty is given. Some advantages and disadvantages of each approach are listed.* ***The purpose.*** *The aim of the article is description of the possibility to test stability of solution of optimization problems when parameters are changing.* ***Method.*** *The author of research proposed a method to solve this problem by*

reducing it to two optimization problems of the same type for completely specific functions, i.e. functions which have exactly known parameters. This is so-called method of determination. The theory of comparison of interval values is touched. ***Novelty.*** *The novelty of the paper is that it shows for the first time the possibility of a uniform mathematical modeling of stability of solution of optimization problem when its parameters are varying. Also concepts of macrostability and microstability of incompletely defined function are introduced.* ***Result****. The algorithm of checking macrostability of optimization problem of completely defined function is given here. A simple example of checking macrostability of concrete optimization task by this algorithm is presented. For this example we selected well-known assignment problem. In addition the algorithm for checking microstability of optimization problem of completely defined function is posed. With this algorithm we tested microstability of specific optimization problem. As mathematical means in research we use methods of interval mathematics.*

Keywords: *conflict, cooperation, neutrality, logic algebra, logical investigations of the systems.*

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Dr. habil. 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. Tel. +7(8412)670-263. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova/Gagarin st., 1A/11.