

SCCS



**Системы управления,
связи и безопасности**

**Systems of Control,
Communication and
Security**

ISSN 2410-9916
<http://sccs.intelgr.com>

№2 2015

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

№ 2
II квартал 2015 г.

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

Абазина Е.С., Ерунов А.А. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДА СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С КОДОВЫМ УПЛОТНЕНИЕМ В ВИДЕОДАНЫХ	1
Ушанев К.В., Макаренко С.И. АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТРАФИКА СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ	26
Макаренко С.И. ВРЕМЯ СХОДИМОСТИ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ ПРИ ОТКАЗАХ В СЕТИ	45
Аганесов А.В. МОДЕЛЬ СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА S-ALOHA	99
Гречишников Е.В., Добрышин М.М. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОГРАММНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СЕТИ СВЯЗИ	135
Юдицкий С.А. СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К ЛОГИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ	147
Кропотов Ю.А., Белов А.А., Проскуряков А.Ю., Колпаков А.А. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АУДИООБМЕНА В СЛОЖНОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКЕ	165
Кропотов Ю.А., Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Колпаков А.А. МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ	184

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.

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 страницах, 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 соответствии 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 требования:

- 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 – 9,8 Мб.

Комплектация издания – 1 CD.

Тираж 100 экз.

УДК 621.396

Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных

Абазина Е. С., Ерунов А. А.

Постановка задачи: информация, передаваемая по открытым каналам связи, подвергается угрозам нарушения доступности и целостности. Актуальные сегодня задачи обеспечения защиты передаваемой информации от искажения все чаще решаются методами цифровой стеганографии. Однако задача организации множественного доступа в скрытом канале передачи информации ранее не ставилась. В статье представлены результаты имитационного моделирования метода скрытой передачи информации в видеоданных, позволяющего увеличить количество информационных направлений связи в одном скрытом канале. **Цель работы:** подтвердить адекватность разработанного научно-методического аппарата кодового уплотнения в структуре видеоданных, позволяющего повысить число информационных направлений связи в скрытом канале при ограничениях на достоверность приема и скрытность встраивания. **Используемые методы.** Повысить число информационных направлений связи в скрытом канале при ограничениях на достоверность приема и скрытность встраивания предлагается за счет использования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных. В качестве показателя достоверности приема выбрана вероятность ошибки на бит извлекаемых данных, а показателем скрытности встраивания – пиковое отношение сигнал-шум. Для субъективной оценки скрытности встраивания введена усредненная субъективная оценка визуального качества видеоданных. **Новизна.** Элементами новизны представленного метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных является использование в нём для формирования скрытого канала с кодовым множественным доступом абонентов системы ортогональных сигналов Франка – Крестенсена, Франка – Уолша, Уолша, упорядоченных по Адамару, Уолша, упорядоченных по Пэли, М-последовательностей, встраиваемых в коэффициенты преобразования Виленкина – Крестенсона. **Результат:** проведенное моделирование позволяет подтвердить адекватность метода кодового разделения информационных направлений связи в скрытом канале. Результаты моделирования показывают, что для задачи организации кодового множественного доступа к среде скрытой передачи в видеоданных наилучшей является система ортогональных сигналов Франка – Крестенсена, которые позволяют достичь более достоверной передачи скрываемой информации, меньшей вероятности идентификации структуры используемых сигналов вероятным нарушителем, устойчивости к некоторым видам геометрических атак и сжатию видеоданных. С точки зрения методики встраивания, установлено, что наилучшими по показателям достоверности и качеству встраивания являются 4 и 5 биты двоичного кода коэффициентов ДКП изображения-контейнера. **Практическая значимость.** Представленные подходы планируются к использованию в системах спутниковой связи цифрового телевидения для создания скрытого обмена информацией в структуре одного видеопотока.

Ключевые слова: видеоданные, стандарты сжатия JPEG, MPEG-2, стеганография, широкополосные сигналы, кодовое уплотнение сигналов, разделение сигналов.

Введение

Интенсивное развитие технологий цифровой обработки сигналов, постоянное совершенствование вычислительной техники и конвергенция телекоммуникационных сетей ставят решение задачи конфиденциальности данных, а также надежной защиты передаваемой информации и прав на нее на одно из приоритетных мест. Среди прочих перспективных направлений обеспечения информационной безопасности все большей популярностью пользуется цифровая стеганография, приобретающая особую актуальность в ситуациях, когда использование криптографических методов и средств невозможно или нецелесообразно. В отличие от криптографии, в области стеганографии в настоящее время в Российской Федерации не предусмотрено государственных стандартов и норм, определяющих терминологию. В связи с этим, введем отдельные определения.

Скрытой передачей информации называют процессы, реализующие методы передачи информации, при которых возможна передача дополнительной информации в структуре данных, представленных в цифровом виде и используемых в качестве контейнера, а также за счет их избыточности.

Под *контейнером* понимают такие цифровые данные, использование избыточности которых позволяет передавать дополнительную информацию, не обнаруживая факта передачи.

Совокупность методик встраивания и извлечения дополнительной информации без обнаружения нарушения целостности контейнера потребителем позволяет говорить о формировании *скрытого канала передачи информации*.

В методах скрытой передачи, рассматриваемых в статье, в качестве контейнеров используются видеоданные. Видеоданными в статье называются подвижные и неподвижные изображения, подвергающиеся цифровой обработке. Выбор видеоданных обусловлен высокой долей видеотрафика (до 60% от общего информационного обмена) в телекоммуникационных сетях, а также существенной избыточностью цифрового видеосигнала.

Обзор отечественной и иностранной литературы [1-6], посвященной скрытой передаче информации, относящейся к области стеганографии, показал, что задача обеспечения возможности множественного скрытого информационного обмена в одном мультимедийном контейнере представляется актуальным и перспективным направлением исследований в области цифровой стеганографии. Однако, вопросам организации скрытого канала передачи информации между несколькими парами абонентов (т.е. уплотнению скрытого канала или созданию нескольких скрытых информационных направлений связи) не уделялось должного внимания, и в такой формулировке задача ранее не ставилась, что и составляет противоречие в науке. В связи с выше изложенным, разработан метод скрытой передачи информации в видеоданных, позволяющий увеличить количество информационных направлений связи (ИНС), организованных в одном скрытом канале передачи информации. Необходимо провести моделирование метода

скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных с целью подтверждения адекватности разработанного научно-методического аппарата, позволяющего повысить число информационных направлений связи в скрытом канале при ограничениях на достоверность приема и скрытность встраивания.

Метод скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных

В ходе исследований проведен анализ наиболее известных методов скрытой передачи информации в видеоданных (таблица 1).

В результате были выделены два основных направления: максимизация пропускной способности скрытого канала при соблюдении требований по его скрытности и максимизация скрытности встраивания информации при обеспечении минимальной пропускной способности скрытого канала (или передачи цифрового водяного знака).

Возможным компромиссом является применение способа прямого расширения спектра (ПРС) встраиваемой информации. При этом используемые в существующих методах широкополосные сигналы (ШПС) имеют значность, равную двум. Ни один из существующих методов скрытой передачи не позволяет организовать несколько скрытых информационных направлений связи в одном стегоконтейнере (таблица 1). Наиболее популярными являются методы наименее значащего бита (НЗБ) и методы ПРС. Популярность метода организации скрытого канала с внедрением в НЗБ обусловлена его простотой и обеспечением максимальной пропускной способности скрытого канала.

Для достижения высокой достоверности и скрытности встраиваемой информации необходимо использовать методы организации скрытого канала с ПРС.

Основной идеей метода является модуляция встраиваемой информации шумоподобным сигналом, благодаря чему достигается высокая достоверность и скрытность встраивания при высоких показателях пропускной способности организуемого скрытого канала. Данный метод, среди прочих, позволяет достичь компромисса между скрытностью и пропускной способностью.

Правило принятия решения о встраивании p в методе организации скрытого канала с ПРС имеет вид:

$$\rho: I'(x, y) = I(x, y) + \theta h(S \cdot \Phi),$$

где: $I(x, y)$ – видеоданные формата JPEG, MPEG-2 размера $X \times Y$, используемые в качестве контейнера для организации скрытого канала;

$I'(x, y)$ – видеоданные, модифицированные встраиваемыми данными скрытого канала;

S – данные скрытого канала;

θ – коэффициент вложения;

$\Phi = \{\phi_i^m\}, i = 1 \dots N$ – система ортогональных функций значности m и с периодом N ;

$h=h_1...h_m$ – значение символа скрываемых данных.

Таблица 1 – Сравнительный анализ известных методов скрытой передачи информации в видеоданных

Классификация методов	Принцип встраивания	Входные данные				Показатель качества стегосистемы, пропускная способность	Выходные данные (характеристики скрытого канала)			
		Видеоданные	Встраиваемая информация	Правило принятия решения о встраивании	Значность используемых сигналов		Скрытность встраивания информации	Пропускная способность скрытого канала	Достоверность скрытой информации	Число ИНС в скрытом канале
I	S	ρ	m	Сравнение выходных данных существующих методов относительно друг друга						
Учет входных данных в методе										
Методы встраивания в пространственную область видеоданных	наименее значащего бита	+	+	+	2	$F_1^{PC}(I, S, \rho_1)$	$U_{BH1} = \min$	$U_{PC1} = \max$	$D_1(S) = \min$	1
	псевдослучайного интервала	+	+	+	2	$F_2^{CKP}(I, S, \rho_2)$	$U_{BH2} > U_{BH1}$	$U_{PC2} < U_{PC1}$	$D_2(S) > D_1(S)$	1
	замены палитры	+	+	+	2	$F_3^{CKP}(I, S, \rho_3)$	$U_{BH3} > U_{BH2}$	$U_{PC3} < U_{PC1}$	$D_3(S) > D_1(S)$	1
Методы встраивания в частотную область видеоданных	относительной замены коэффициентов ДКП	+	+	+	2	$F_4^{CKP}(I, S, \rho_4)$	$U_{BH4} > U_{BH1}$	$U_{PC4} = \max$	$D_4(S) > D_1(S)$	1
	встраивания в группу коэффициентов дискретного косинусного преобразования ДКП	+	+	+	2	$F_5^{CKP}(I, S, \rho_5)$	$U_{BH5} > U_{BH4}$	$U_{PC5} < U_{PC1}$	$D_5(S) > D_4(S)$	1
	блочного встраивания с перестановкой в зависимости от характера видео	+	+	+	2	$F_6^{CKP}(I, S, \rho_6)$	$U_{BH6} > U_{BH5}$	$U_{PC6} < U_{PC1}$	$D_6(S) > D_1(S)$	1
Методы прямого расширения спектра встраиваемой информации		+	+	+	2	$F_7^{PC}(I, S, \rho_7, m)$	$U_{BH6} > U_{BH5}$ $U_{BH6} < U_{BH8}$	$U_{PC7} = \max$	$D_7(S) = \max$	1
Статистические методы скрытой передачи		+	+	+	2	$F_8^{CKP}(I, S, \rho_8)$	$U_{BH8} = \max$	$U_{PC8} < U_{PC7}$	$D_8(S) > D_5(S)$	1

Извлечение сформированного скрываемого сигнала с ПРС на приемной стороне осуществляется пользователем, который обладает информацией об используемой системе базисных функций с применением корреляционного

декодера. Исследования и расчеты, приведенные в [1-6] показали, что наиболее вероятная атака (воздействие аддитивным шумом) противника, наблюдающего за скрытым информационным обменом, будет неэффективна при любой статистике шума.

На основе проведенного анализа была сформулирована и формализована научная задача исследования, которая заключается в разработке научно-методического аппарата кодового уплотнения скрытого канала в структуре видеоданных, позволяющего повысить число информационных направлений связи (ИНС) в одном скрытом канале при ограничениях на достоверность приема и скрытность встраивания:

$$K_{скр}(I, \rho, S, m, \Phi, \theta) \rightarrow \max_{I' \in U, S \in V},$$

где $U = \{R(I'), hist(I'), q(I'), p_{обн}(I')\}$ – множество ограничений на скрытность встраивания в видеоданные, оцениваемая по показателям:

- $R(I') \geq 25$ дБ – пиковое отношение сигнал-шум видеоданных I' после модификации данными скрытого канала S ;
- $hist_{max}(I') \neq 2\theta$ – анализ гистограммы видеоданных I' , отсутствие раздвоения пика гистограммы I' ;
- $q(I')$ – усредненная субъективная оценка визуального качества видеоданных I' , не хуже «хорошо»;
- $p_{обн}(I') \leq 0,01$ – вероятность обнаружения в видеоданных I' всех частей матрицы скрытого канала;

$V = \{C_{скр}(S_k), P_{ош}(S'_k), k\}$ – множество ограничений на достоверность приема скрываемых данных S , оцениваемой по показателям:

- $C_{скр}(S_k) \geq 1,2$ кбит/с – минимальная пропускная способность единичного скрытого канала S_k ;
- $P_{ош}(S_k) \leq 10^{-3}$ – вероятность ошибочного приема на бит для скрываемых данных на приемной стороне S'_k ;
- $k \geq 5$ – минимальное число скрываемых каналов, определяемое требованиями по резервированию основных спутниковых каналов [7].

Подробное описание метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением, применяемых модели и комплекса алгоритмов представлено в работах [8–14].

Ограничениями для метода, представленного в статье, являются стандарты сжатия, использующие дискретное косинусное преобразование, а именно стандарты JPEG и MPEG-2 для неподвижных и подвижных изображений соответственно.

Суть метода состоит в проведении операций, представленных на рис. 1. Разработанный метод предполагает реализацию следующих основных новых этапов: проведение предварительных прямого и обратного ортогонального преобразования в базисе функций Виленикина-Крестенсона (В-К) над

видеоданными I , с одновременным встраиванием в область оцифрованного спектра В-К в парные биты, а также применение двумерных шумоподобных сигнальных конструкций (ДШСК) Франка-Крестенсена (Ф-К) для кодового уплотнения скрытого канала.

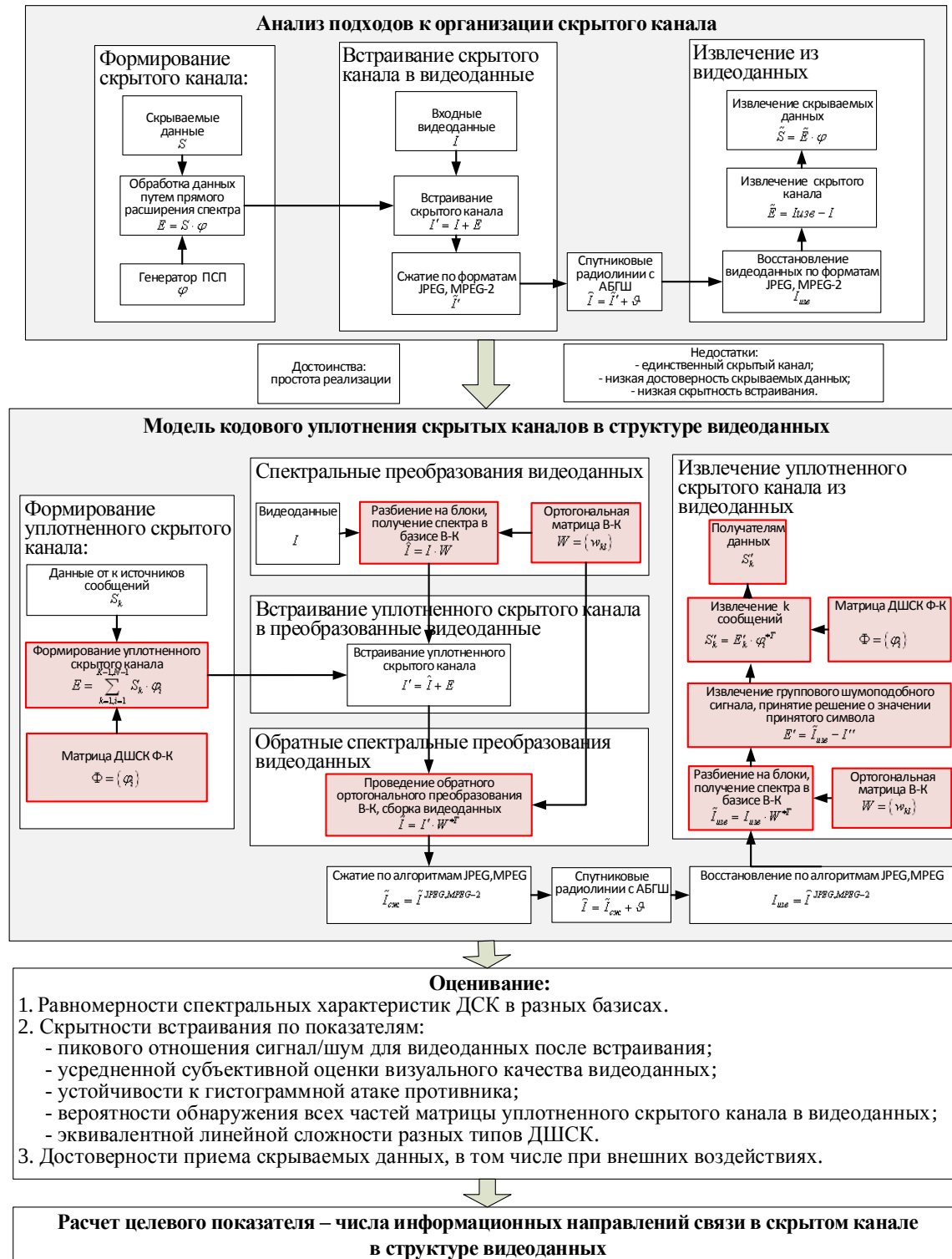


Рис. 1. Метод кодового уплотнения скрытого канала в структуре видеоданных

Суть формирования уплотненного скрытого канала состоит в проведении кодирования укрупнением скрываемых данных с последующим разбиением на группы каналов и модуляцией ДШСК Ф-К, со значностью, равной четырем и обладающими блочной структурой. Блочная структура ДШСК Ф-К согласованна с алгоритмами сжатия видеоданных JPEG, MPEG-2, предполагающими деление матриц изображения на блоки размерностью 16x16 пикселей. Размер блока равен двукратному увеличению единичного блока изображения, применяемому в стандартах сжатия JPEG, MPEG-2 и для контрастных видеоданных, не содержащих мелких деталей. Использование блоков указанной размерности не снижает качества изображения и незначительно влияет на вычислительную сложность алгоритмов сжатия.

Блочность структуры ДШСК Ф-К проявляется в следующем: на любом периоде сигналов группы из 16 отсчетов являются ортогональными. Это свойство позволяет достичь большей достоверности передачи скрываемой информации по сравнению с ортогональными сигналами, не имеющими блочной структуры, а также повысить число бит встраиваемой информации в одном контейнере при фиксированном ограничении на качество встраивания и время идентификации. Предположение о том, что сигналы Ф-К являются наилучшими для задачи организации уплотненного скрытого канала в видеоданных подтверждено результатами исследований, представленными в работах [13–15].

Результаты моделирования

Для подтверждения, проверки и выработки рекомендаций по реализации заявляемого метода было проведено моделирование скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных с использованием программ Mathcad и MATLAB.

В качестве входных изображений-контейнеров использовались неподвижные цветные изображения формата bmp, в качестве входных данных для встраивания – две случайных последовательности с алфавитом $\{-1, 1\}$. Встраивание осуществлялось в яркостную составляющую Y изображения, поскольку именно она обладает наибольшей избыточностью при представлении цветных видеоданных моделью YCrCb. В качестве ДШСК для расширения спектра информационных последовательностей использовались 5 типов сигналов, значения коэффициента дельта-корреляции которых наиболее близки к единице [16–20] (рис. 2, 3):

- сигналы Франка-Крестенсена (Ф-К) (красная кривая графиков);
- сигналы Франка-Уолша (синяя пунктирная кривая графиков);
- сигналы Уолша, упорядоченные по Адамару (розовая штрих-пунктирная кривая графиков);
- сигналы Уолша, упорядоченные по Пэли (голубая кривая графиков);
- М-последовательность (зеленая пунктирная кривая графиков).

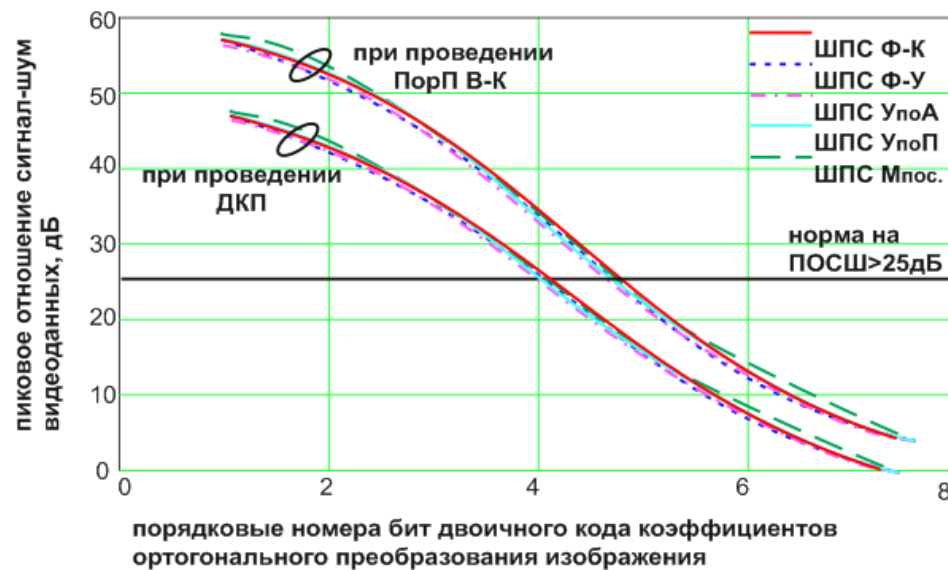


Рис. 2. Зависимость пикового отношения сигнал-шум видеоданных от выбора парных бит оцифрованного спектра видеоданных

В качестве модели шума выбран аддитивный белый гаусовский шум.

Основными контролируемыми параметрами выбраны параметры из множеств ограничений на скрытность встраивания и достоверность приема, которые были определены на этапе постановки задачи.

Вероятность ошибочного приема на бит извлекаемых данных (далее вероятность ошибки на бит), значение которой определяется:

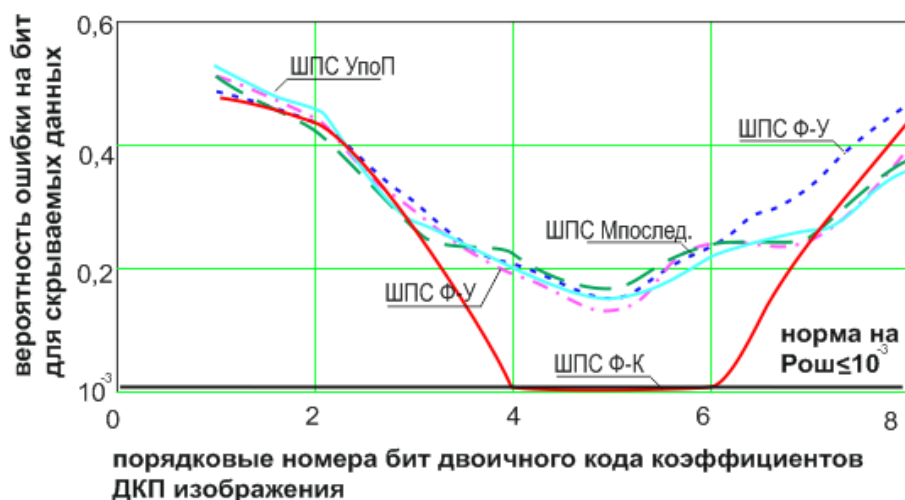
$$p_{ош} = \frac{n_{ош}}{N},$$

где $n_{ош}$ – количество ошибочно принятых бит, а N – общее число бит скрыто переданной информации.

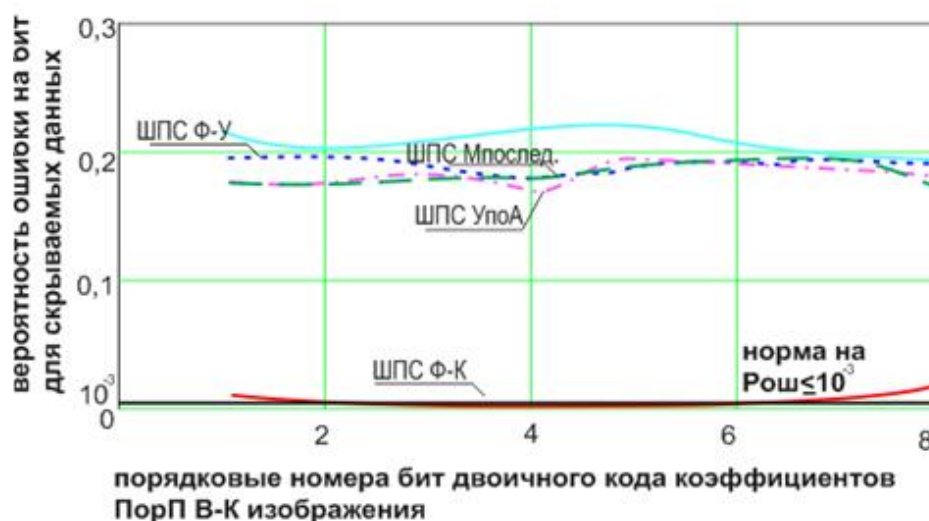
Пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ) – показатель, позволяющий аналитически оценить уровень объективных искажений, которые вносятся в контейнер при скрытой передаче информации [1, 3] и вычисляемый как:

$$R = 10 \lg \frac{255^2 \cdot XY}{\sum_{x=1}^{X-1} \sum_{y=1}^{Y-1} (C_{x,y} - S_{x,y})^2},$$

где 255 – максимальное значение яркости полутонового изображения, $C_{x,y}$ и $S_{x,y}$ – значения пикселей с координатами (x, y) пустого и заполненного контейнеров соответственно, $X \times Y$ – размер изображения с X строками и Y столбцами. ГОСТ [21] устанавливает нормы на значения ПОСШ, при этом качество видеоданных считается «отличным», если значения ПОСШ не хуже 60 дБ, при значении ПОСШ не хуже чем 25 дБ качество видеоданных принимается «удовлетворительным».



а. Встраивание в область спектра ДКП видеоданных



б. Встраивание в область спектра В-К видеоданных

Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки на бит скрываемых данных от выбора парных бит оцифрованного спектра видеоданных

Для проверки наложенных ограничений по скрытности встраивания было проведено оценивание по показателю пикового отношения сигнал-шум видеоданных после модификации. Получены семейства кривых, характеризующие зависимость значений пикового отношения сигнал-шум видеоданных от номера первого из парных бит двоичного кода коэффициентов спектра видеоданных для всех типов двумерных шумоподобных сигнальных конструкций при проведении спектральных преобразований ДКП и В-К. Графики свидетельствуют, что скрытность встраивания в область спектра В-К видеоданных по показателю ПОСШ для всех типов ДШСК выше, чем при встраивании в область спектра ДКП.

Также проведено оценивание достоверности скрываемых данных для всех типов выбранных ДШСК при встраивании в области спектров ДКП и В-К

видеоданных. Зависимости вероятности ошибочного прима на бит для скрывааемых данных от номера пары бит для встраивания представлены на рис. 3.

встраивание в область спектра В-К позволяет снизить вероятность ошибки на бит для всех используемых ДШСК, а для ДШСК Ф-К – достичь достоверности приема не хуже 10^{-3} на большем диапазоне пар бит оцифрованных спектральных компонент. Совместный анализ полученных зависимостей, представленных на рис. 2, 3 позволяет сделать вывод о невозможности встраивания данных нескольких ИНС в область оцифрованного спектра ДКП, поскольку требования по обеспечению скрытности встраивания и достоверности приема не выполняются одновременно при использовании любых выбранных ДШСК. Встраивание же данных нескольких ИНС в область оцифрованного спектра В-К в парные биты 2 и 3, 3 и 4, 4 и 5 при использовании ДШСК Ф-К не противоречит предъявляемым требованиям по достоверности приема и скрытности встраивания.

В связи с тем, что объективные оценки искажения изображений не всегда коррелируют с субъективным восприятием изображений, государственным стандартом по оценке качества цветных телевизионных изображений [22] введена усредненная субъективная оценка визуального качества видеоданных, рассчитываемая как:

$$q = \frac{1}{MRK} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^R \sum_{l=1}^K q_{iml}$$

где M – число наблюдателей, R – число испытательных изображений; K – число предъявлений каждого изображения, i – номер наблюдения, m – номер испытательного изображения, l – номер предъявления, q_{iml} – оценка m -ого испытательного изображения i -м наблюдателем при l -м предъявлении.

Для субъективной оценки визуального качества видеоданных в соответствии с лабораторными методами, регламентированными ГОСТ 26320-84. Для наблюдения была выбрана группа из 18 человек, не являющихся специалистами в области телевидения; 10 изображений, над которыми проводились процедуры встраивания и извлечения дополнительной информации в пару бит контейнера 4, 5; число предъявлений оставило 5 раз.

Тестируемые изображения должны содержать разные элементы: крупные планы лиц на разных фонах, мелкие детали, контрастные детали. Примеры тестовых изображений представлены на рис. 4.

Пример изображений со встроенными данными в область спектра ДКП видеоданных, в область спектра В-К видеоданных, а также изображения, модифицированные скрываемыми данными и проведением сжатия и зашумления видеоданных, представлены на рис. 5.

При этом для каждого типа изображений с применяемым типом искажений должно быть проведено не менее двух сеансов наблюдений. В соответствии с

ГОСТ [22], для субъективной оценки используются шкала ухудшения качества изображений и шкала качества изображений, представленные в таблице 2.



а.

б.

Рис. 4. Примеры изображений



Рис. 5. Изображения, модифицированные скрываемыми данными

Таблица 2 – Шкалы субъективной оценки изображений

Мнение наблюдателя	Качество изображения	Оценка
Ухудшение незаметно	Отличное	5
Ухудшение заметно, но не мешает	Хорошее	4
Ухудшение несколько мешает	Удовлетворительное	3
Ухудшение мешает	Плохое	2
Ухудшение очень мешает	Очень плохое	1

В результате проведения субъективной оценки указанным методом были получены усредненные оценки для встраивания информации с использованием всех ДШСК, участвующих в сравнении в каждый тип изображений, представленных двумя изображениями.

Из проведенной субъективной оценки ясно, что изображения, подвергнутые встраиванию в область оцифрованного спектра В-К с использованием ДШСК Ф-К, отличаются более высоким качеством (и, соответственно, меньшей степенью ухудшения качества изображения) по сравнению со встраиванием в область спектра ДКП видеоданных, при этом качество изображений после встраивания оценивается как «отличное» и «хорошее».

Одной из наиболее распространенных атак противника, направленных на обнаружение скрытого канала, организованного методом с ПРС, является гистограммная атака.

Гистограммой видеоданных называется график статистического распределения элементов цифрового изображения с различной яркостью, в котором по оси абсцисс представлена яркость, по оси ординат – число пикселей с конкретным значением яркости. Гистограммная атака с целью обнаружения скрытого канала в видеоданных основана на оценке гистограммы изображения и поиске, так называемых, «двух пиков». Гистограммы изображений любой статистики, как правило, содержат изолированные пики (рис. 6). Для тех изображений, которые ярко выраженных пиков не содержат, применяется предварительная фильтрация. В результате в визуальном представлении видеоданных остаются лишь туманные контуры изображения, и появляется лишь один пик в гистограмме. Встраивание скрытого канала в видеоданные с применением метода с ПРС приводит к раздвоению основного пика гистограммы изображения. Причем, чем больше скрываемой информации встроено, тем больше расстояние между пиками, и равно двукратному значению коэффициента встраивания (20).

Для оценки устойчивости к гистограммной атаке разработанного метода организации скрытого канала с кодовым уплотнением в видеоданных были получены гистограммы для следующих случаев (рис. 6, 7):

- 1) видеоданные без встраивания;

- 2) видеоданные со встроенным скрытым каналом в области спектра ДКП изображения;
- 3) видеоданные со встроенным скрытым каналом в области спектра В-К, изображения.

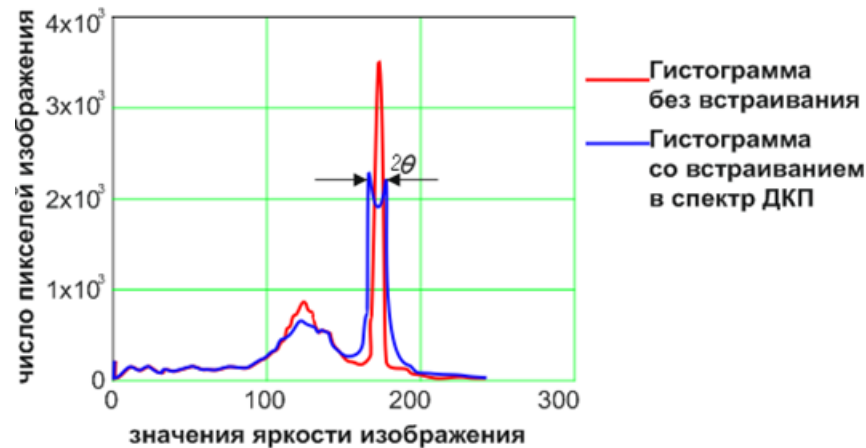


Рис. 6. Сравнение гистограмм изображения до и после встраивания в спектр ДКП

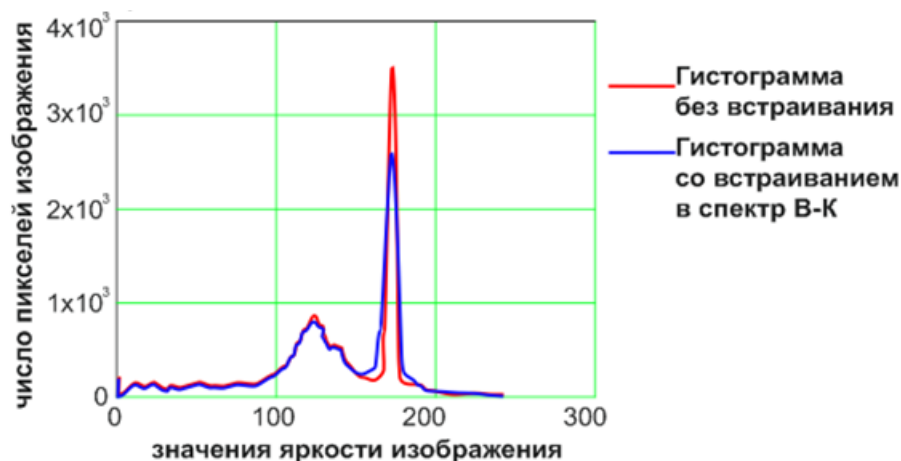


Рис. 7. Сравнение гистограмм изображения до и после встраивания в спектр В-К

Для расчетов использовались ДШСК Ф-К, показавшие себя наилучшими для решения поставленной задачи.

Для исходных видеоданных, в которые осуществлялось встраивание, яркость принимает значения от 0 до 255. Размер изображения 256x256 пикселей, то есть всего – 65536 пикселей.

Из рис. 6 видно, что осуществление встраивания скрытого канала в спектральную область ДКП изображения не позволяет достичь скрытности к факту обнаружения при проведении противником гистограммной атаки.

Графики, полученные на рис. 7, свидетельствуют о неэффективности применения гистограммной атаки с целью обнаружения встраивания скрытого

канала с применением метода ПРС с использованием ДШСК Ф-К только в случае проведения предварительных двойных спектральных преобразований в базисе В-К.

Кроме того, были получены зависимости изменения распределения яркости между пикселями изображения для разработанного метода организации скрытого канала от выбора пары бит двоичного кода коэффициентов оцифрованного спектра В-К, в которых осуществлялось встраивание (рис. 8). Результаты расчетов показали, что модификация значений пары бит 4 и 5 данными скрытого канала искажают гистограмму изображения незначительно, и не приводят к образованию так называемых «двух пиков», а следовательно выбор именно этой пары бит для встраивания в методе будем считать наилучшим.

Также были получены зависимости изменения распределения яркости между пикселями изображения для разработанного метода организации скрытого канала от степени сжатия видеоданных (рис. 9) и уровня шума в канале (рис. 10) при встраивании в пару бит 4 и 5.

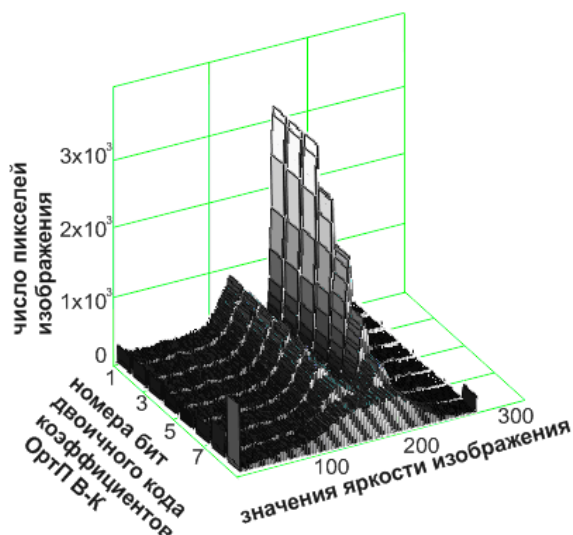


Рис. 8. Зависимость изменения гистограммы изображения от выбора парных бит оцифрованного спектра В-К для встраивания

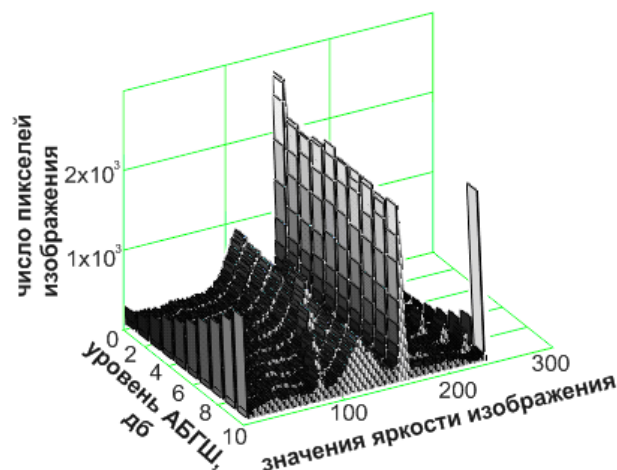


Рис. 9. Зависимость изменения гистограммы изображения от уровня АБГШ в канале

Полученные графики на рис. 8-10 соответствуют применению разработанного метода с ПРС при использовании для встраивания данных скрытых каналов – ДШСК Ф-К.

Сравнение графиков рис. 8-10 позволяет подтвердить тот факт, что встраивание информации нескольких ИНС в одном скрытом канале в видеоданные с использованием ДШСК Ф-К в паре с двойным спектральным преобразованием изображения в базисе В-К оказывает на модифицируемые видеоданные влияние, схожее с влиянием шумов канала и сжатием изображения.

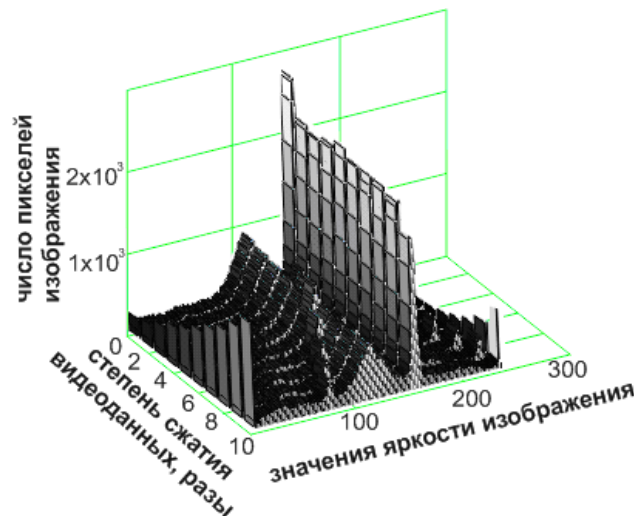


Рис. 10. Зависимость изменения гистограммы изображения от степени сжатия видеоданных

Таким образом, организация скрытого канала с кодовым уплотнением в видеоданных методом с ПРС и при использовании ДШСК Ф-К в паре с двойным спектральным преобразованием в базисе В-К позволяет считать разработанный метод устойчивым к гистограммной атаке противника.

В соответствии с разработанной методикой встраивание матрицы уплотненного скрытого канала может осуществляться только в основные кадры (I -кадры) видеоряда. Тогда вероятность $p_{обн}$ обнаружения всех частей, составляющих матрицу группового шумоподобного сигнала при использовании схемы Бернулли, когда число m частей матрицы заранее не известно, будет определяться в соответствии с биномиальным законом распределения:

$$p_{обн} = C_n^m p^m \cdot (1-p)^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m \cdot (1-p)^{n-m},$$

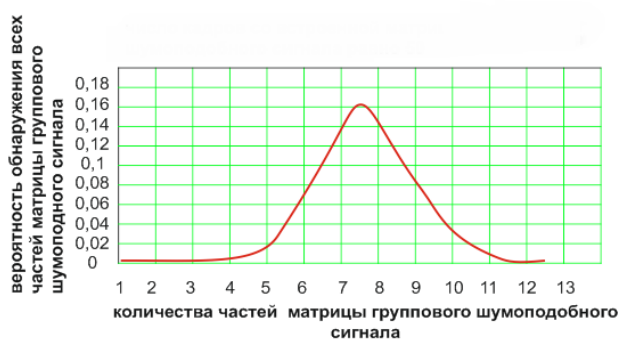
где n – число I -кадров в MPEG-файле, а p – параметр биномиального закона распределения – вероятность обнаружения любой из частей встроенной матрицы при $m > 0$.

Тогда, исходя из объема встраиваемых данных, вероятность $p_{обн}$ в первом приближении может быть принята равной $1/m$, что согласуется с теми соображениями, что чем меньше объем и больше частей закладки, тем меньшие изменения будут внесены в I -кадр MPEG-файла, и тем меньше вероятность $p_{обн}$. В соответствии с этим

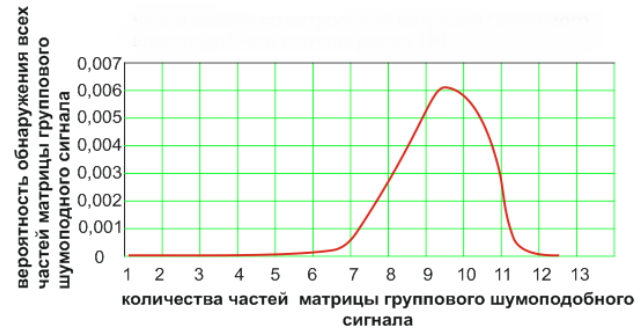
$$p_{обн} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot \frac{(m-1)^{n-m}}{m^n} \quad (1)$$

Наглядно распределение вероятностей $p_{обн}$ обнаружения всех частей составляющих матрицу с учетом (1) представлено графиками на рис. 11 (а-г) для

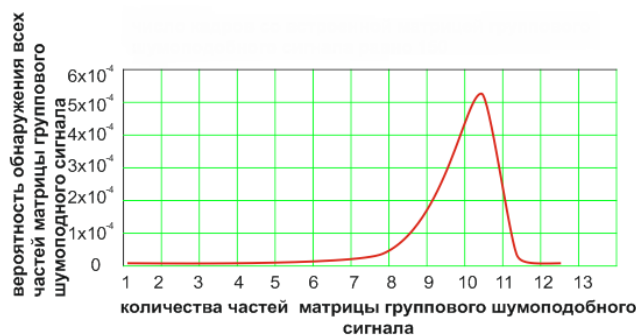
различных значений числа модифицируемых кадров изображения и количества частей матрицы группового шумоподобного сигнала.



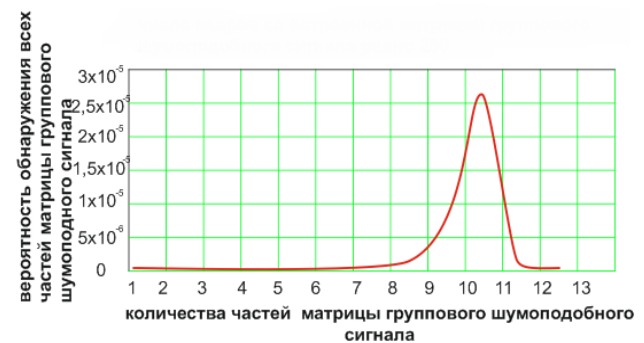
а. $n=50$



б. $n=100$



в. $n=150$



г. $n=200$

Рис. 11. Распределение вероятностей $p_{обн}$ обнаружения всех частей составляющих матрицу от количества таких частей при разном числе анализируемых модифицируемых кадров

Графики на рис. 11 показывают, что при увеличении числа модифицируемых кадров видео-контейнера вероятность обнаружения всех частей закладки существенно снижается, а наиболее вероятное значение обнаруженных частей закладки чрезвычайно медленно смещается в сторону больших значений.

Таким образом, разработанный метод организации канала скрытой передачи информации с уплотнением в структуре сжимаемых видеоданных уже при 100 обработанных кадрах типа I (или набора из 100 неподвижных изображений), при одновременном разбиении матрицы на более мелкие части, удовлетворяет требованиям по скрытности, оцениваемым показателем $p_{обн}$ вероятности обнаружения всех частей составляющих встроенную матрицу менее 0,01.

Для неподвижных изображений формата JPEG пропускная способность, по смыслу соответствующая максимальному количеству информации, которое возможно встроить в контейнер, не обнаружив себя, и передать со скоростью передачи информации, характерной для используемого контейнера, может быть рассчитана:

$$C_{\Sigma стег} = \theta N_{осн} d m,$$

где: $N_{осн}=m^{2\zeta}$ – период используемого ДШСК, $N_{осн}\leq X\leq Y$; X, Y – количество пикселей изображения-контейнера; θ – коэффициент вложения, определяющий число матриц группового скрываемого сигнала максимального периода; d – число разрядов двоичного кода коэффициента ортогонального преобразования, модифицируемой встраиваемыми данными; m – значность используемых ДШСК.

Так, для ДШСК Ф-К, применяемых в предложенном методе, $m=4$, длина периода $N=m^{2\zeta}$, $\zeta\neq 1$. Для различных размеров кадра изображения может варьироваться в пределах от 16 до 1024 (при выполнении условия невозможности превышения наименьшего из измерений изображения). Математическое моделирование позволило сделать вывод о том, что период 256 для разработанного метода является оптимальным с точки зрения обеспечения большей пропускной способности и достоверности при выполнении требования по скрытности. Использование ДШСК с меньшими периодами позволяют экспоненциально увеличить количество встраиваемой информации, но достоверность и скрытность снижаются по логарифмическому закону. Использование периода в 1024 знака позволяет достичь высоких показателей достоверности и скрытности, но пропускная способность встраиваемой информации будет снижена. Расчеты приведены в таблице 3. Значение θ для разработанного метода равно единице.

Для подвижных изображений формата MPEG-2 пропускная способность уплотненного канала скрытой передачи может быть рассчитана:

$$C_{\Sigma стс} = \frac{\theta N_{осн} d \cdot m \cdot f}{G},$$

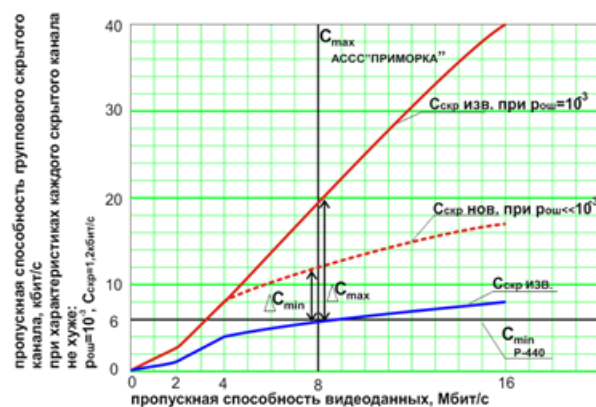
где: f – частота кадров видео; G – размер группы кодирования видео, который определяет количество частоты следования основных кадров изображения (I-кадров), используемых для встраивания.

Характеристики X, Y, f и G определяются профилями и уровнями, которые включает в себя стандарт MPEG-2. Число разрядов двоичного кода коэффициента ортогонального преобразования, модифицируемой встраиваемыми данными d тоже косвенным образом зависит от выбранного профиля MPEG-2, так как зависит от глубины кодирования изображения (яркости и цветности), т.е. используемого числа разрядов. Чем больше разрядов требуется для представления изображения, тем большее число младших разрядов можно модифицировать встраиваемыми данными. Для представленного метода $d=2$.

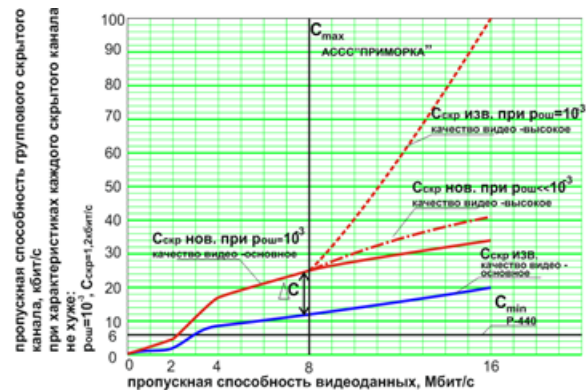
Результаты расчета пропускной способности уплотненного скрытого канала и количество ИНС в одном контейнере для разного качества видеоданных представлены рис. 12, 13.

Таблица 3 – Пропускная способность уплотненного скрытого канала для видео-контейнеров разного качества

Уровни	Хар-ки	Профили			JPEG		MPEG-2	
		Прос-той	Основ-ной	Высо-кий	Параметры ШПС число матриц/ период	$U_{ПС}^{JPEG}$ кбит/с число каналов	Параметры ШПС число матриц/ период	$U_{ПС}^{MPEG-2}$ кбит/с число каналов
	Яркость/ цветность	4:2:0	4:2:0/ 4:2:2	4:2:2				
Низкий	X		352		1x256	1024/1	1x256	2133/1
	Y		288					
	f		25					
	G		12					
	$R_{ВИДЕО}^*$		до 2Мбит/с					
Основной	X	720	720	720	4x256	4096/3	4x256	8533/7
	Y	576	576	576				
	f	25	30	50				
	G	12	12	12				
	$R_{ВИДЕО}^*$	2-4Мб/с	4-8Мб/с	8-16Мб/с				
Высокий	X		1440	1440	1x1024+ 4x256	10578/8	1x1024+ 4x256	22037/18
	Y		1152	1152				
	f		30	50				
	G		12	12				
	$R_{ВИДЕО}^*$		8-16Мб/с	16-60Мб/с				



а.



б.

Рис. 12. Зависимость пропускной способности, измеренной в количестве информации в единицу времени, уплотненного скрытого канала от качества видеоданных

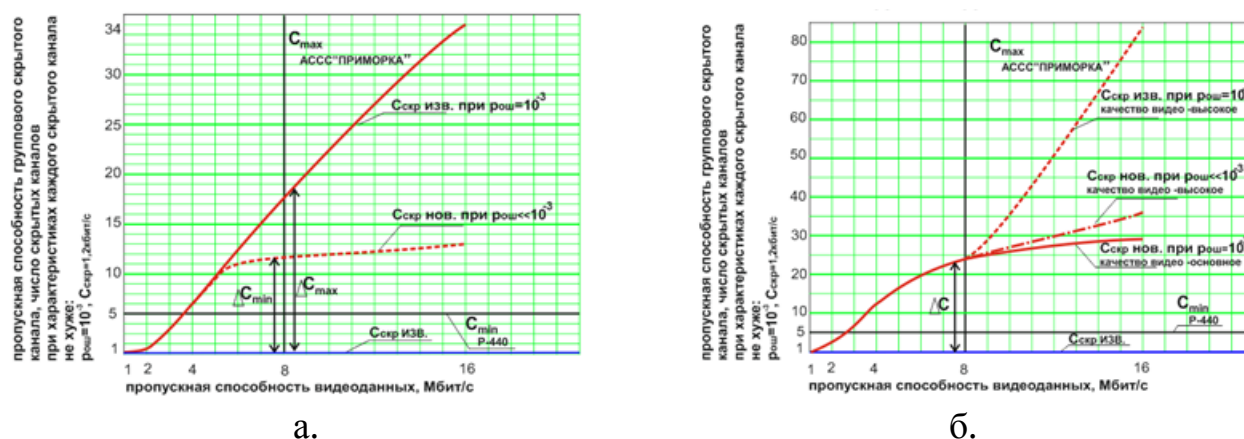


Рис. 13. Зависимость пропускной способности, измеренной в количестве ИНС в одном скрытом канале, уплотненного скрытого канала от качества видеоданных

Прирост пропускной способности уплотненного скрытого канала в видеоданных с применением разработанного метода составляет от 1 кбит/с до 27 кбит/с для максимально возможной скорости передачи информации, равной 8 Мбит/с. Выигрыш в пропускной способности зависит от типа данных (изображение JPEG, видео MPEG-2), их качества представления и скорости передачи информации видеопотока (рис. 12, 13). Полученный прирост, в два раза превышает пропускную способность скрытого канала, организованного методом прямого расширения спектра с применением ДШСК. Применение ДШСК Ф-К с выраженной блочной структурой позволяют в одном кадре изображения размещать несколько матриц со встроенными данными, оптимальным размером для которых является 256x256.

Заключение

В статье представлены результаты проведенного моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных с использованием программ Mathcad, MATLAB.

Так, из результатов моделирования следует, что для задачи организации множественного доступа к среде скрытой передачи в видеоданных наилучшими являются ДШСК Ф-К в паре с ортогональным преобразованием в базисе В-К в отношении обеспечения более достоверной передачи, более высокого качества встраивания, устойчивости к гистограммной атаке и сжатию видеоданных. Полученные результаты обоснованы наилучшими значениями показателя дельта-корреляции и ярко выраженной блочной структурой ДШСК, описанными в работах [15–20].

С точки зрения методики встраивания установлено и подтверждено графиками, представленными в статье, что наилучшими по показателям достоверности и качеству встраивания являются 4 и 5 биты двоичного кода коэффициентов оцифрованного спектра В-К изображения-контейнера.

Таким образом, описанный метод, подтвержденный проведенным моделированием, позволяет повысить пропускную способность скрытого канала примерно в 2 раза и увеличить число ИНС со скоростью 1,2 кбит/с в одном скрытом канале передачи информации до 12–25 в зависимости от качества и скорости передачи видеоданных.

Литература

1. Конахович Г. Ф., Пузыренко А. Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс. 2006. 283 с.
2. Smith J., Comiskey B. Modulation and information Hiding in Image // Information Hiding: First Int. Workshop «InfoHiding'96», Springer as Lecture Notes in Computing Science. 1996. Vol. 1174. pp. 207-227.
3. Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В. Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс. 2002. 272 с.
4. Marvel L., Boncelet C., Retter J. Reliable Blind Information Hiding for Images // Proceedings of 2nd Workshop on Information Hiding. Lecture Notes in Computer Science. 1998.
5. Koch E., Zhao J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. 1995. pp. 123-132.
6. Fridrich J. Combining low-frequency and spread spectrum watermarking // Proceedings of the SPIE Conference on Mathematics of Data/Image Coding. Compression and Encryption. 1998. Vol. 3456. pp. 2-12.
7. Учебник сержанта (станции спутниковой связи Р-440-О, Р-441-О, Р-439). СПб.: ВАС, 1996. 137 с.
8. Абазина Е. С. Алгоритмы внедрения двумерных нелинейных кодовых последовательностей в структуру сжатых видеоданных // Вопросы радиоэлектроники в сфере техники телевидения. 2013. № 1. С. 85–94.
9. Абазина Е. С. Построение стеганографического канала передачи информации с кодовым уплотнением в видеопотоке // Молодежь. Техника. Космос; Доклады VI Общероссийской молодежной научно-технической конференции БГТУ. СПб.: БГТУ, 2014. С. 165–167.
10. Федосеев В. Е., Абазина Е. С. Математическая модель стегакодера для скрытого канала с кодовым уплотнением в структуре видеоданных // Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем. Материалы XXXII Всерос. научно-технической конференции. Серпухов: СВИ РВ, 2014. С 17–21.
11. Цветков К. Ю., Абазина Е. С. Особенности создания стеганографического канала передачи информации с кодовым уплотнением в видеопотоке // Тезисы докладов III Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. С. 237 – 239.

12. Абазина Е. С. Постановка задачи организации скрытого канала передачи информации с кодовым уплотнением в спутниковых радиолиниях для решения задач управления войсками // Материалы докладов Всерос. научно-практической конференции курсантов, слушателей и молодых ученых, посвященной Дню образования войск связи. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. № 1. С. 385 – 388.
13. Абазина Е. С. Метод скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Информация и космос. 2014. № 4. С. 33 – 38.
14. Цветков К. Ю., Коровин В. М. Дискретный гармонический анализ и его приложения к задачам синтеза оптимальных сигналов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. 108 с.
15. Цветков К. Ю. Теория оптимальных систем сложных дискретных сигналов и её приложения. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. 160 с.
16. Цветков К. Ю., Малозёмов В. Н. Об оптимальной паре сигнал–фильтр // Проблемы передачи информации. 2003. Т. 1. Вып. 2. С. 50–62.
17. Цветков К. Ю., Федосеев В. Е., Абазина Е.С. Применение двумерных нелинейных сигналов Франка-Уолша, Франка-Крестенсона в методе формирования скрытого канала с кодовым уплотнением в структуре сжимаемых видеоданных // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2013. № 4. С 32–40.
18. Абазина Е. С., Ерунов А. А. Выбор сигнальных конструкций для формирования скрытого канала передачи информации с кодовым уплотнением в структуре видеоданных // Региональная информатика-2014. Материалы докладов конференции. СПб.: СПОИСУ, 2014. С 46–47.
19. Цветков К.Ю., Абазина Е. С. О влиянии вида ортогонального преобразования на степень допустимого сжатия изображения при передаче по спутниковой радиолинии широкополосных ЦВЗ // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий. Труды VI Всерос. научно-технической конференции. М.: РНИИ КП, 2013. С. 91–93.
20. Абазина Е. С. Выбор кодовых последовательностей для формирования широкополосных цифровых водяных знаков // II Межвузовская научно-практическая конференция. Материалы докладов. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 44–46.
21. ГОСТ 26320-84. Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений. М.: Изд-во стандартов, 1985. 8 с.
22. ГОСТ Р 52722-2007. Каналы передачи цифровых телевизионных сигналов. Основные параметры и методы измерений. М.: Стадартинформ, 2007. 18 с.

References

1. Konakhovich G.F., Puzirenko A.U. *Komp'iuternaia steganografiia. Teoriia i praktika* [Computer steganography. Theory and practice]. Kiev, MK-Press Publ., 2006, 283 p. (in Russian).
2. Smith. J., Comiskey B., Modulation and information Hiding in Image. *Information Hiding. First Int. Workshop «InfoHiding'96»*. Springer as Lecture Notes in Computing Science. vol. 1174, 1996, pp. 207-227.
3. Gribunin V. G., Okov I. N., Turincev I. V. *Tsifrovaia steganografiia* [Digital Steganography]. Moscow, Solon-Press Publ., 2009, 272 p. (in Russian).
4. Marvel L., Boncelet C., Retter J. Reliable Blind Information Hiding for Images. *Proceedings of 2nd Workshop on Information Hiding. Lecture Notes in Computer Science*. 1998.
5. Koch E., Zhao J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling. *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. 1995. pp. 123-132.
6. Fridrich J. Combining low-frequency and spread spectrum watermarking. *Proceedings of the SPIE Conference on Mathematics of Data/Image Coding, Compression and Encryption*. 1998, Vol. 3456, pp. 2-12.
7. *Uchebnik serzhanta (stantsii sputnikovoi sviazi R-440-O, R-441-O, R-439)*. [The textbook of the sergeant (station of satellite communication P-440-O, P-441-O, P-439)]. Saint-Petersburg, Military academy of communications Publ., 1996. 137 p. (in Russian).
8. Abazina E. S. Algoritmy vnedreniia dvumernykh nelineinykh kodovykh posledovatel'nostei v strukturu szhatykh videodannykh [Algorithms of introduction of two-dimensional nonlinear code sequences in structure of the compressed video data]. *Voprosy radioelektroniki v sfere tekhniki televideniia*, 2013, vol. 1, pp. 85–94 (in Russian).
9. Abazina E. S. Postroenie steganograficheskogo kanala peredachi informatsii s kodovym uplotneniem v videopotoke [Construction of the steganographic channel information transfer with code consolidation in a video stream]. *Molodezh'. Tekhnika. Kosmos; Doklady VI Obshcherossiiskoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii BGTU* [Youth. Technics. Space. Proc. Balt. State Techn. Univ. 6th All-Russian Youth Sci. and Tec. Conf.]. Saint-Petersburg, Baltic State Technic University Publ., 2014, pp. 165–167 (in Russian).
10. Fedoseev V. E., Abazina E. S. Matematicheskaiia model' stegokodera dlia skrytogo kanala s kodovym uplotneniem v strukture videodannykh [Mathematical model of the stegocoder for the hidden channel with code consolidation in structure of the video data]. *Problemy effektivnosti i bezopasnosti funktsionirovaniia slozhnykh tekhnicheskikh i informatsionnykh sistem; Materialy XXXII Vseros. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Problems of Efficiency and Safety of Functioning Difficult Technical and Information Systems.Proc.32nd All-Russian Sci. and Tec. Conf.]. Serpukhov, Serpukhov Military Rocket Institute Publ., 2014, pp. 17–21 (in Russian).

11. Tsvetkov K. U., Abazina E. S. Osobennosti sozdaniia steganograficheskogo kanala peredachi informatsii s kodovym uplotneniem v videopotoke [Features of creation steganographic the channel of information transfer with code consolidation in a video stream]. *Tezisy dokladov III Vserossiiskogo kongressa molodykh uchenykh.* [Abstracts of Papers of 3rd All-Russian Congress of Young Scientists]. Saint-Petersburg, University of the Information`s Technology, Mechanics and Optics Publ., 2014, pp. 237–239 (in Russian).

12. Abazina E. S. Postanovka zadachi organizatsii skrytogo kanala peredachi informatsii s kodovym uplotneniem v sputnikovykh radioliniakh dlia resheniia zadach upravleniia voiskami [Statement of a problem of the organization of the hidden channel of information transfer with code consolidation in satellite radio lines for the decision of problems of management of armies]. *Materialy dokladov Vseros. nauchno-prakticheskoi konferentsii kursantov, slushatelei i molodykh uchenykh, posviashchennoi Dniu obrazovaniia voisk sviazi* [Day of Formation of Armies of Communication Proc. of the All-Russian Sci.-Pract. Conf. 32nd All-Russian Sci. and Tec. Conf.]. Voronezh, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Military Air Academy Publ., 2013, vol. 1, pp. 385 – 388 (in Russian).

13. Abazina E. S. The method of hidden data transmission with code consolidation. *Informatsiia i kosmos*, 2014, no. 4, pp. 33-38 (in Russian).

14. Tsvetkov K. U., Korovin V. M. Diskretnyi garmonicheskii analiz i ego prilozheniia k zadacham sinteza optimal'nykh signalov. Monografiia [The discrete harmonious analysis and its appendices to problems of synthesis of optimum signals.Treatise]. Saint-Petersburg, A. F. Mozhaisky Military space academy Publ., 2008, 108 p. (in Russian).

15. Tsvetkov K. U. Teoriia optimal'nykh sistem slozhnykh diskretnykh signalov i ee prilozheniia. [The Theory of optimum systems of difficult discrete signals and its applications]. Saint-Petersburg, A. F. Mozhaisky Military space academy Publ., 2005, 160 p. (in Russia).

16. Tsvetkov K. U., Malozermov V. N. Ob optimal'noi pare signal–fil'tr. [About optimum pair the signal-filter]. *Problems of Information Transmission*, 2003, Part. 1. no. 2. pp. 50–62 (in Russian).

17. Tsvetkov K. U., Fedoseev V. E., Abazina E. S. Application of two-dimensional nonlinear signals of Frank-Uolsh, Frank-Krestenson into the method of formation of the hidden channel with code consolidation in structure of the compressed video data. *H&ES Research*, 2013, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

18. Abazina E. S., Erunov A. A. Vybor signal'nykh konstruktsii dlia formirovaniia skrytogo kanala peredachi informatsii s kodovym uplotneniem v strukture videodannykh [Choice of alarm designs for formation of the latent channel of information transfer with code consolidation in structure of the video data]. *Regional'naia informatika-2014. Materialy dokladov konferentsii* [Regional Computer Science-2014. Abstracts of Papers]. Saint-Petersburg, St. Petersburg Society of Informatics, Computing, Communications and Control Systems Publ., 2014, pp. 46–47 (in Russian).

19. Tsvetkov K. U., Abazina E. S. O vliianii vida ortogonal'nogo preobrazovaniia na stepen' dopustimogo szhatiia izobrazheniia pri peredache po sputnikovoi radiolinii shirokopolosnykh TsVZ [About influence of a kind of orthogonal transformation on degree of admissible compression of the image by transfer on a satellite radio line broadband DWM]. *Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniia i informatsionnykh tekhnologii; Trudy VI Vseros. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Actual problems of space-rocket instrument making and information technology Proc. of All-Russia Sci. and VI-th Tec. Conf.]. Moscow, Scientific Research Institute of Space Instrument Engineering Publ., 2013, pp. 91–93 (in Russian).

20. Abazina E. S. Vyor kodovykh posledovatel'nostei dlia formirovaniia shirokopolosnykh tsifrovyykh vodianykh znakov. [Choice of code sequences for formation of broadband digital watermarks]. *II Mezhvuzovskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia. Materialy dokladov* [Abstracts of Papers of 2nd All-Russian Congress of Young Scientists]. Saint-Petersburg, University of the Information's Technology, Mechanics and Optics Publ., 2013. pp. 44–46 (in Russian).

21. State Standard 26320-84. Equipment of television studio and extrastudio. Methods of value judgment of quality of colour television images. Moscow, Standartov Publ., 1985. 8 p. (in Russian).

22. State Standard P 52722-2007. Channels of transfer of digital television signals. Key parametres and methods of measurements. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 18 p. (in Russian).

Статья поступила 21 марта 2015 г.

Информация об авторах

Абазина Евгения Сергеевна – адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов - стеганография. Тел.: +7 911 794 44 92. e-mail: e.s.abazina@yandex.ru

Ерунов Анатолий Александрович – адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов - стеганография. Тел.: +7 911 289 22 05. e-mail: erun_to@mail.ru

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

Results of the Modelling of the Method of the Hidden Information Transfer with Using of the Code Consolidation in the Video Data

Abazina E. S., Erunov A. A.

Problem Statement: the information transmitted in open communication channels, can threatened violation availability and integrity. Nowadays Actual task of the protection of transmitted information from

distortion are increasingly solved by digital steganography. However, the task of the multiple access`es organization in the hidden information channel is not previously posed. IN the article results of the simulation method secure data transmission in the video are presented, which allows to increase the number of data lines of communication within a hidden channel. **Objective:** To confirm the adequacy of the developed scientific methodological apparatus of the code consolidation in the video data, which allows to increase the number of data lines of communication within a hidden channel, with limited reliability of the receiving and hiddenless of the integration. **The methods used.** To increase the number of data lines of communication within a hidden channel, with limited reliability of the receiving and hiddenless of the integration by the use method of the hidden information transfer with code consolidation in the video data. The bit error probability of recoverable data is selected as an indicator of the reliability of receiving and the peak of signal to noise ratio is selected as an indicator of stealth integration . The subjective averaged assessment of visual quality video introduced for subjective assessment of the hiddenless of the integration. **Novelty:** the novel features of the presented method of the hidden information transfer with code consolidation in the video data are using in this method of orthogonal signals Frank - Krestensena, Frank - Walsh, Walsh ordered Hadamard, Walsh ordered by Paley, M-sequences embedded in the transform coefficients Vilenkin – Christenson for generating a hidden channel with code multiple access of the system subscribers. **Result.** This simulation allows to confirm the adequacy of the method of code division of the data lines of communication within a hidden channel . The simulation results show that for the purposes of the organization code multiple access to the medium of the hidden transmission in the video the best system is the of orthogonal signals Frank – Krestensena,s which allows to achieve more reliable transmission of hidden information, less probably of the structure identification of the used signals by likely breaker and resistance from certain types of geometric attacks and video compression. As a point of view of the integration techniques, it was founded that the best bits of binary image-container DCT coefficients in terms of quality and reliability of the integration are 4 and 5 bits. **The practical significance.** The presented approach are planned for using in the satellite communication systems of digital television for creating the exchange of information hidden in the structure of a video stream.

Keywords: video data, compression standards JPEG, MPEG-2, steganography, broadband signals, code consolidation of signals, division of signals.

Information about Authors

Abazina Evgeniya Sergeevna – Doctoral Student. Postgraduate at the Department of networks and communication systems of space complexes. The A. F. Mozhaitsky Military Space Academy. Field of research - steganography. Tel.: +7 911 794 44 92. e-mail: e.s.abazina@yandex.ru

Erunov Anatoliy Aleksandrovich – Doctoral Student. Postgraduate at the Department of networks and communication systems of space complexes. The A. F. Mozhaitsky Military Space Academy. Field of research - steganography. Tel.: +7 911 289 22 05. e-mail: erun_to@mail.ru

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

УДК 004.724.4

Аналитико-имитационная модель функционального преобразования трафика сложной структуры

Ушанев К. В., Макаренко С. И.

Постановка задачи: структурная сложность, как свойство циркулирующего в сетях связи трафика, актуализирует вопросы обеспечения устойчивости их функционирования путем повышения своевременности обслуживания трафика в коммутационных узлах. Известные способы обеспечения устойчивости, основывающиеся на адаптации узлового коммутационного оборудования сети связи к параметрам передаваемого трафика, достаточно широко изучены и описаны в литературе. Менее изученным способом обеспечения устойчивости функционирования сети связи является адаптация передаваемого трафика к ее параметрам. **Целью работы** является обеспечение устойчивости сети связи за счет преобразования трафика сложной структуры в трафик соответствующий простейшему потоку. В качестве критерия сложности структуры трафика предлагается использовать его дисперсионную характеристику - коэффициент вариации интервалов времени между поступающими пакетами. В качестве модели трафика сложной структуры используется поток, имеющий Парето-распределение и коэффициент вариации больше единицы. **Используемые методы:** преобразование трафика основано на применении известного научно-методического аппарата функционального преобразования законов плотностей вероятности. **Новизной** данной работы является учет показателей времени задержки при преобразовании трафика и вероятности отказа в обслуживании пакета из-за переполнения буфера при выполнении преобразования. **Результат:** представленное решение позволит провести моделирование процесса преобразования трафика с учетом вышеуказанных показателей процесса преобразования и в дальнейшем обосновать объем буфера и значение интенсивности отправки пакетов преобразованного трафика. Обоснование этих параметров будет использовано при разработке преобразователя трафика. **Практическая значимость.** Реализация такого преобразователя в составе узлового оборудования в сети позволит повысить своевременность обслуживания преобразованного трафика по сравнению с трафиком сложной структуры в 6-8 раз. Это приведет к росту устойчивости сети на значения, пропорциональные повышению своевременности.

Ключевые слова: сеть связи, трафик, структурная сложность трафика, преобразование структуры трафика, качество обслуживания трафика.

Актуальность

Развитие современных телекоммуникационных технологий, рост мультимедийного трафика (передача данных, речи, видео и др.) постоянно повышают требования, предъявляемые к пропускной способности сетей связи (СС), к качеству обслуживания трафика QoS (Quality of service). Анализ работ [1-6] показал, что одним из свойств мультимедийного трафика является его структурная сложность. Под трафиком сложной структуры понимается трафик, у которого коэффициент вариации c_τ интервалов времени между поступающими пакетами имеет значения $c_\tau > 1$. Коэффициент вариации [1] – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность, и вычисляемая в соответствии с выражением

$$c_\tau = \sigma_\tau / m_\tau, \quad (1)$$

где τ - интервал времени между пакетами трафика, m_τ - математическое ожидание (МОЖ) значений интервалов времени между поступлением пакетов

трафика; σ_τ - среднее квадратическое отклонение (СКО) значений интервалов времени между поступлением пакетов трафика.

Проведенный анализ результатов исследований по передаче трафика сложной структуры [2-5] показал, что при повышении структурной сложности по показателю коэффициента вариации (от $c_\tau=1$ до $c_\tau=2$), своевременность обслуживания в узлах коммутации сформированного трафика снижается в 6-8 раз [7] относительно обслуживания простейшего трафика ($c_\tau=1$). Причем данный эффект наблюдается на высоконагруженных коммутаторах.

Также структурная сложность трафика может быть результатом информационно-технических воздействий, приводящих к снижению своевременности обслуживания трафика в отдельных узлах коммутации [6]. Таким образом, происходит снижение качества обслуживания трафика за счет как увеличения времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$, так и повышения вероятности отказа в обслуживании пакета $P_{\text{отк}}$, что в свою очередь ведет к снижению значений показателя устойчивости информационного направления связи (ИНС) и СС в целом (рис. 1) [8].

Под информационным направлением связи понимается совокупность линий и узлов связи, обеспечивающих связь между двумя абонентами сети.

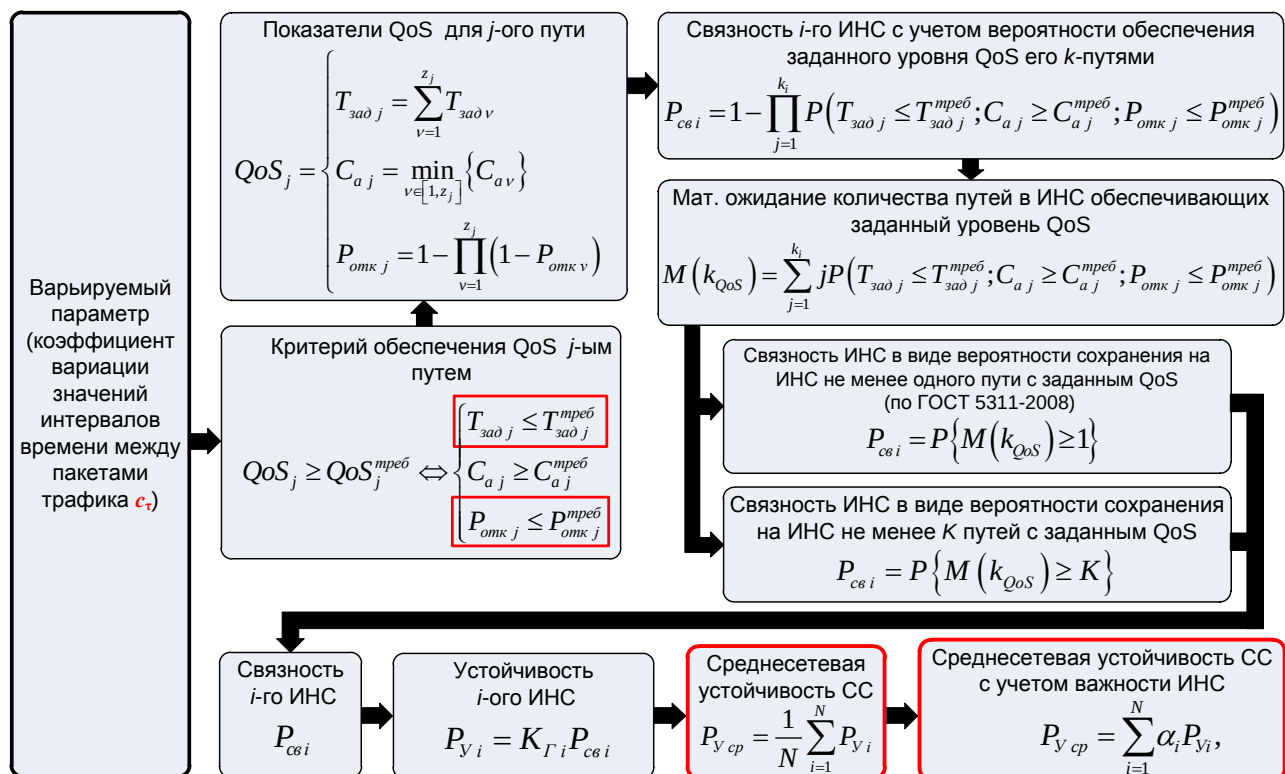


Рис. 1. Влияние коэффициента вариации c_τ на устойчивость сети связи

В настоящее время решение задачи повышения устойчивости сети связи с учетом циркулирующего в ней трафика сложной структуры можно разделить на два основных направления:

- 1) адаптация узлового коммутационного оборудования сети связи к параметрам передаваемого трафика;
- 2) адаптация передаваемого трафика к параметрам сети связи.

К исследованиям по первому направлению решения задачи повышения устойчивости сети связи относятся работы:

- Рыжикова Ю.И. по расчету систем обслуживания с групповым поступлением заявок [9], по расчету системы обслуживания с распределениями Кокса [10];
- Будко П.А., Бурька А.С., Емельянова А.В., Краснокутского А.В., Шлаева Д.В. [11] по определению ресурса пропускной способности каналов связи на сети с коммутацией пакетов различных приоритетов в условиях изменяющейся нагрузки;
- Алиева Т.И. [12] по моделированию гиперэкспоненциального трафика с помощью многофазных экспоненциальных систем;
- Чакрян Е.А. [13] по моделированию телетрафика и каналов передачи данных в условиях помех;
- Цыбакова Б.С. [14] по моделированию трафика с расчетом асимптотических параметров трафика;
- Бахарева Н.Ф., Тарасова В.Н., Ушакова Ю.А. [2] по моделированию трафика на основе двумерной диффузионной аппроксимации процессов функционирования систем массового обслуживания;
- Малофеев О.П., Фомина Л.А., Родионова В.В., Ряднова Д.С. [15] по построению математической модели оценки эффективности и качества сети связи при обслуживании самоподобного трафика, используя в качестве модели самоподобного трафика с распределением Парето;
- Агеева Д.В., Игнатенко А.А., Копылева А.В. [16] по разработке основных расчетных выражений параметров обслуживания потоков в узлах телекоммуникационной сети, используя в качестве самоподобного трафика фрактальное Броуновское движение;
- Дейнеко Ж.В., Замула А.А., Кириченко Л.О., Радивилова Т.А. [17] по разработке математической модели самоподобного стохастического процесса на основе экспоненциального преобразования ФБД.

А также более раннюю работу одного из авторов [18] по рассмотрению подходов к моделированию непуассоновских информационных потоков и оценке моделей степени соответствия информационным потокам сетей интегрального обслуживания.

Работы по имитационному моделированию, циркулирующего в сетях связи, трафика:

- Рыжикова Ю.И. [19];
- Шелухина О.И., Иванова Ю.А., Пастухова А.С. [20] по исследованию влияния самоподобия ON-OFF источников на скорость интернет-трафика;
- Привалова А.Ю., Боевой М.В. [21] по проведению имитационного моделирования сетевого телекоммуникационного трафика, обладающего самоподобными свойствами с заданным параметром Херста;
- Привалова А.Ю., Благова А.В. [22] по имитационному моделированию трафика сложной структуры с помощью ON-OFF моделей.

А также более ранняя работа одного из авторов [23] по построению имитационной модели формирования трафика сложной структуры.

Ко второму направлению решения задачи повышения устойчивости сети связи относятся работы: Кучерявого Е.А. [24] по управлению трафиком и качеством обслуживания в сети; Назарова А.Н., Сычева К.И. [25] по расчету и управлению приоритетным трафиком в узловом оборудовании сетей NGN; Линца Г.И., Фомина Л.А., Скоробогатова С.А., [26] по формированию самоподобного трафика в телекоммуникационных системах и последующим его преобразованием.

Данная работа относится ко второму направлению решения задачи повышения устойчивости сети связи и основана на функциональном преобразовании трафика, впервые предложенным в работе Линца Г.И., Фомина Л.А., Скоробогатова С.А. [26]. В ней предлагалось направление возможного снижения структурной сложности входного трафика и математическая модель преобразования распределения входного трафика. В своих дальнейших работах [27-29] Линец Г.И. совместно с коллегами решает задачу обеспечения инвариантности мультисервисной сети к структуре входного трафика на основе его функционального преобразования.

Для обеспечения защиты трафика от ИТВ, направленных на преднамеренное формирование сложной структуры трафика ($c_t > 1$), в данной работе предлагается разработать методику преобразования трафика (рис. 2) для снижения его структурной сложности ($c_t \rightarrow 1$). При этом в качестве основы решения этой задачи предлагается использовать научно-методический аппарат (НМА) функционального преобразования трафика предложенного в работах научной школы Линца Г.И. [26-29].

Анализ исследований [26-29] показал, что полученные в них результаты не обосновывают границы и область применения НМА преобразования с учетом требований по качеству обслуживания трафика (задержка преобразования, объем буфера). В настоящей работе акцент сделан именно на учете этих ранее не исследованных аспектах преобразования трафика, что составляет научную новизну проводимого исследования.

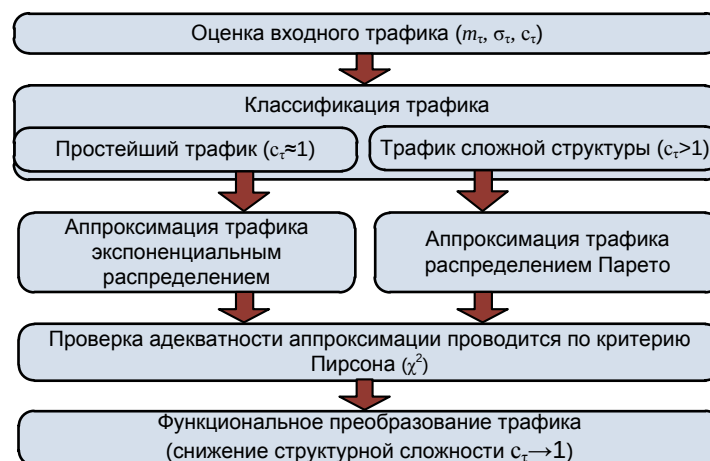


Рис. 2. Последовательность шагов решения задачи снижения структурной сложности трафика

Для формализации задачи разработки модели преобразования трафика введем следующие обозначения:

τ_{par} – интервал времени между поступлениями отдельных пакетов трафика с распределением Парето;

α – параметр формы трафика с распределением Парето;

k – коэффициент масштаба трафика с распределением Парето;

$m(\tau_{\text{par}})$ – МОЖ значений интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов трафика с распределением Парето;

$\sigma(\tau_{\text{par}})$ – СКО значений интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов трафика с распределением Парето;

τ_{exp} – интервал времени между отправкой пакетов преобразованного трафика, имеющего экспоненциальное распределение;

λ – интенсивность отправки пакетов трафика после преобразования;

$m(\tau_{\text{exp}})$ – МОЖ значений интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов трафика с экспоненциальным распределением;

$\sigma(\tau_{\text{exp}})$ – СКО значений интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов трафика с экспоненциальным распределением;

$c_\tau = \sigma_\tau / m_\tau$ – коэффициент вариации значений интервалов времени между поступлениями отдельных пакетов трафика;

Q – объем буфера памяти, с использованием которого ведется преобразование трафика;

$P_{\text{отк}}$ – вероятность отказа в обслуживании трафика при наличии буфера памяти объемом Q ;

n_Q – значение очереди пакетов в буфере памяти объемом Q ;

$T_{\text{зад}}$ – время задержки пакета от момента его поступления до момента отправки в составе преобразованного трафика;

$m(T_{\text{зад}})$ – МОЖ времени задержки пакета $T_{\text{зад}}$ в буфере памяти объемом Q в процессе преобразования;

$\sigma(T_{\text{зад}})$ – СКО времени задержки пакета $T_{\text{зад}}$ в буфере памяти объемом Q в процессе преобразования;

$m(n_Q)$ – МОЖ текущей очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки (преобразования) в буфере памяти объемом Q ;

$\sigma(n_Q)$ – СКО текущей очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки (преобразования) в буфере памяти объемом Q .

Аналитико-имитационная модель

Общая структура имитационной модели преобразования трафика для снижения его структурной сложности представлена на рис. 3.

Данная аналитико-имитационная модель осуществляет процесс преобразования трафика с интервалами времени между пакетами, имеющими распределение Парето ($c_\tau > 1$) в трафик с экспоненциальным распределением ($c_\tau \approx 1$) в соответствии с математическими зависимостями, представленными в работах [26-29].

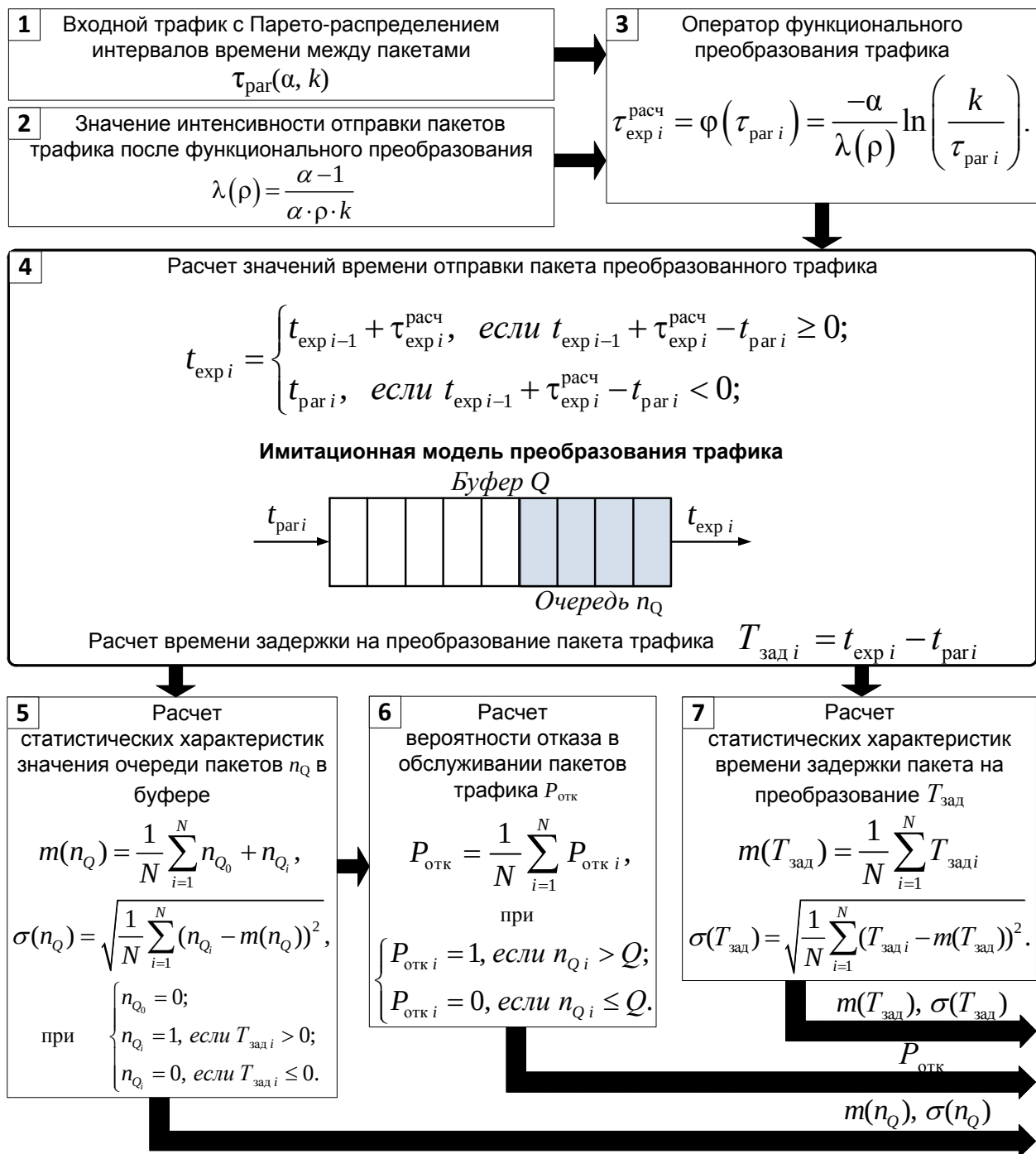


Рис. 3. Общая структура аналитико-имитационной модели преобразования трафика

На первом этапе (перед проведением имитационного) моделирования задаются значения всех входных параметров, используемых в процессе преобразования трафика:

- значение общего числа пакетов N входного трафика с распределением Парето в i -м прогоне модели;
- значение числа прогонов модели M ;
- коэффициент масштаба входного трафика с распределением Парето $k \in [10^{-4}; 10^4]$ (определяет минимальное время между поступлением пакетов);

- параметр формы входного трафика с распределением Парето $\alpha \in (1; 2]$;
- буфер памяти объемом Q , с использованием которого ведется преобразование трафика;
- интенсивность отправки пакетов преобразованного трафика с экспоненциальным распределением λ (варьируемый параметр) из буфера объемом Q .

На втором этапе моделирования (при проведении имитационного моделирования) на вход оператора функционального преобразования трафика [26] поступают значения интенсивности λ отправки пакетов преобразованного трафика и интервалов времени $\tau_{\text{par } i}$ между отдельными пакетами трафика с Парето-распределением (блок 1, 2 рис. 3). Значения интервалов времени между пакетами входного трафика с распределением Парето $\tau_{\text{par } i}$ генерируются в соответствии с выражением

$$\tau_{\text{par } i} = \frac{k}{(1 - \text{rnd}(1))^{1/\alpha}}. \quad (2)$$

Расчетные значения интервалов времени между пакетами преобразованного трафика с экспоненциальным распределением $\tau_{\text{exp } i}^{\text{расч}}$ полученные на выходе оператора функционального преобразования (3) поступают на вход имитационной модели.

$$\varphi(\tau_{\text{par } i}) = \tau_{\text{exp } i}^{\text{расч}} = \frac{-\alpha}{\lambda} \ln \left(\frac{k}{\tau_{\text{par } i}} \right). \quad (3)$$

В результате прогона имитационной модели временные характеристики процесса преобразования трафика, представленного на рис. 4, определяются следующими выражениями:

- момент времени $t_{\text{par } i}$ поступления i -го пакета в имитационную модель
 $t_{\text{par } i} = t_{\text{par } i-1} + \tau_{\text{par } i}, i = [1; N];$ (4)
- момент времени $t_{\text{exp } i}$ отправки i -го пакета преобразованного трафика из буфера памяти Q (см. блок 4, рис. 3)

$$t_{\text{exp } i} = \begin{cases} t_{\text{exp } i-1} + \tau_{\text{exp } i}^{\text{расч}}, & \text{если } t_{\text{exp } i-1} + \tau_{\text{exp } i}^{\text{расч}} - t_{\text{par } i} \geq 0; \\ t_{\text{par } i}, & \text{если } t_{\text{exp } i-1} + \tau_{\text{exp } i}^{\text{расч}} - t_{\text{par } i} < 0; \end{cases}. \quad (5)$$

Необходимость введения данной системы обусловлена случаями, когда время задержки пакета в буфере памяти Q от момента поступления до момента его отправки в составе преобразованного трафика (блок 4, рис. 3), равное

$$T_{\text{зад } i} = t_{\text{exp } i-1} + \tau_{\text{exp } i}^{\text{расч}} - t_{\text{par } i} = t_{\text{exp } i} - t_{\text{par } i} \quad (6)$$

может быть меньше нуля: $T_{\text{зад } i} \leq 0$, что противоречит физическому смыслу моделируемого процесса. Для устранения этого противоречия отправка пакета осуществляется сразу же после его поступления $t_{\text{exp } i} = t_{\text{par } i}$, пакет не задерживается в буфере, а покидает модель мгновенно, без выполнения преобразования (пакет № 4 на рис. 4).

Если значение времени задержки $T_{\text{зад } i} > 0$ (пакеты № 2, 3, 5 на рис. 4), то пакет поступает в буфер памяти объемом Q и ожидает времени отправки $t_{\text{exp } i}$ (в

соответствии с заданным значением интенсивности λ отправки пакетов преобразованного трафика).

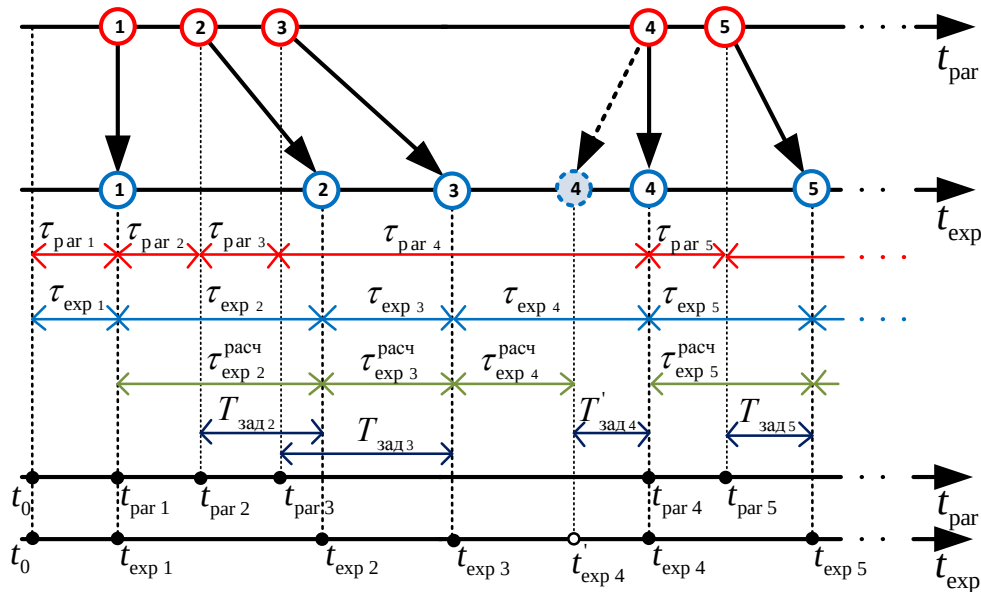


Рис. 4. Временные характеристики процесса преобразования трафика

Аналитико-имитационная модель позволяет определить следующие значения характеристик преобразования трафика со сложной структурой:

- МОЖ текущей очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q (блок 5, рис. 3)

$$m(n_Q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_{Q_i} + n_{Q_0} ; \quad (7)$$

- СКО текущей очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q (блок 5, рис. 3)

$$\sigma(n_Q) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_{Q_i} - m(n_Q))^2} ; \quad (8)$$

- вероятность отказа в обслуживании трафика $P_{\text{отк}}$ при ограничении на объем буфера Q (блок 6, рис. 3)

$$P_{\text{отк}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{\text{отк } i} ; \quad (9)$$

- МОЖ времени задержки преобразования пакета $m(T_{\text{зад}})$ в буфере памяти объемом Q (блок 7, рис. 3)

$$m(T_{\text{зад}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{зад } i} ; \quad (10)$$

- СКО времени задержки преобразования пакета $\sigma(T_{\text{зад}})$ в буфере памяти объемом Q (блок 7, рис. 3)

$$\sigma(T_{\text{зад}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{зад } i} - m(T_{\text{зад}}))^2} . \quad (11)$$

Предложенная аналитико-имитационная модель преобразования трафика сложной структуры ($c_\tau > 1$), позволяет получить значения статистических характеристик, оказывающих влияние на качество обслуживания трафика (времени задержки преобразования пакета трафика $T_{\text{зад}}$, вероятности отказа в обслуживании пакета трафика $P_{\text{отк}}$), обосновать предложения по объему буфера памяти Q . Снижение структурной сложности трафика ($c_\tau \rightarrow 1$) за счет применения функционального преобразования трафика позволит повысить своевременность обслуживания преобразованного трафика по сравнению с трафиком сложной структуры (у которого $c_\tau = 2$) в 6-8 раз.

В приложении 1 представлен программа в MathCad и результат аналитико-имитационного моделирования процесса преобразования трафика с параметрами:

- общее число прогонов модели $M=4$;
- общее число пакетов в прогоне $N=100000$;
- коэффициент масштаба трафика с распределением Парето $k=1$;
- параметр формы трафика с распределением Парето $\alpha=1,7$;
- интенсивность трафика с экспоненциальным распределением $\lambda=0,458$;
- объем буфера $Q=1400$.

Вывод

Реализация представленного преобразователя трафика в составе узлового оборудования в сети позволит повысить своевременность обслуживания преобразованного трафика по сравнению с трафиком сложной структуры в 6-8 раз. Это приведет к росту устойчивости сети на значения, пропорциональные повышению своевременности.

Приложение 1

Входные параметры

Общее число опытов Порядковый номер опыта

$M := 4$

$j := 0..M - 1$

Параметры распределения Парето

Общее число пакетов	Порядковый номер пакета	Коеф. масштаба	Параметр формы
$N := 100000$	$i := 1..N$	$k := 1.0$	$\alpha := 1.7$

Параметры Экспоненциального распределения

Интенсивность

λ

Значение интервалов времени между поступлением пакетов (Парето распределение)

$$\tau_{1_par_{i,j}} := \frac{k}{\frac{1}{(1 - md(1))^\alpha}}$$

Значение интервалов времени между поступлением пакетов (Экспоненциальное распределение)

$$\tau_{2_exp_{i,j}} := \frac{-\alpha}{\lambda} \ln \left(\frac{k}{\tau_{1_par_{i,j}}} \right)$$

Значение времени поступления очередного пакета трафика с распределением Парето

$$tt_{par_{i,j}} := tt_{par_{i-1,j}} + \tau_{1_par_{i,j}}$$

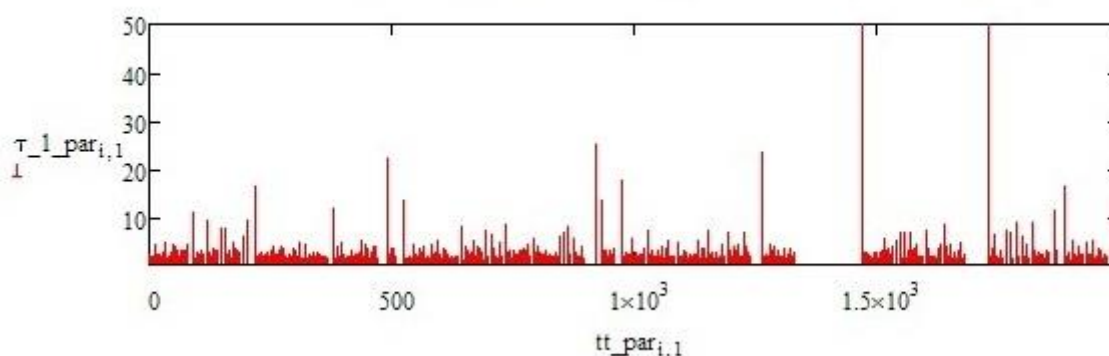
Значение времени отправки очередного пакета трафика с Экспоненциальным распределением

$$tt_{2_exp_{i,j}} := \begin{cases} tt_{2_exp_{i-1,j}} + \tau_{2_exp_{i,j}} & \text{if } (tt_{2_exp_{i-1,j}} + \tau_{2_exp_{i,j}} - tt_{par_{i,j}}) \geq 0 \\ tt_{par_{i,j}} & \text{if } (tt_{2_exp_{i-1,j}} + \tau_{2_exp_{i,j}} - tt_{par_{i,j}}) < 0 \end{cases}$$

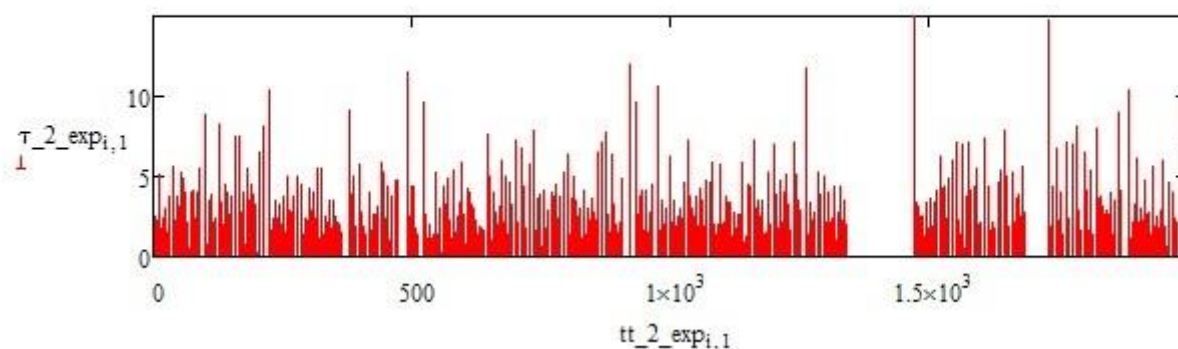
Значение времени между поступлением и отправкой очередного преобразованного пакета

$$t_{zad_{i,j}} := tt_{2_exp_{i,j}} - tt_{par_{i,j}}$$

Значения интервала времени между пакетами (закон Парето)



Значения интервала времени между пакетами (Экспоненциальный закон)



МОЖ значений времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$ в буфере памяти объемом Q в одном прогоне модели

$$m_t_zad_analit_j := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_zad_{i,j}$$

МОЖ значений времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$ в буфере памяти объемом Q в M -прогонах модели

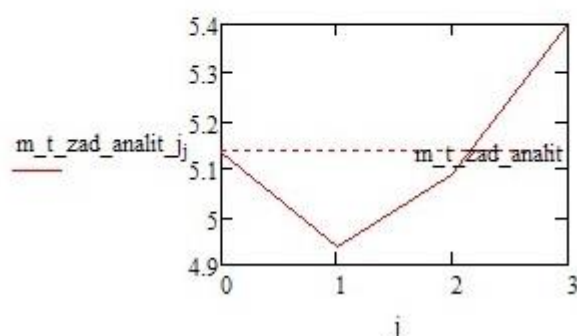
$$m_t_zad_analit := \text{mean}(m_t_zad_analit_j)$$

$$m_t_zad_analit = 5.14$$

$$\frac{1}{N \cdot M} \cdot \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=1}^N t_zad_{i,j} = 5.14$$

$$\text{mean}(t_zad) = 5.14$$

График МОЖ значений времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$ в j -ом прогоне модели



СКО значений времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$ в буфере памяти объемом Q в одном прогоне модели

$$\sigma_t_zad_analit_j := \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (t_zad_{i,j} - m_t_zad_analit)^2}$$

СКО значений времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$ в буфере памяти объемом Q в M -прогонах модели

МОЖ текущего значения очереди пакетов, ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q в одном прогоне модели

$$n_Q_{0,j} := 0$$

$$n_Q_{i,j} := \text{if}(t_zad_{i,j} > 0, n_Q_{i-1,j} + 1, 0)$$

$$n_Q_j := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N n_Q_{i,j}$$

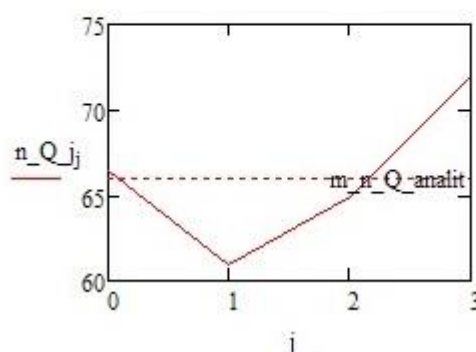
МОЖ текущего значения очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q в M -прогонах модели

$$\frac{1}{N \cdot M} \cdot \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=1}^N n_Q_{i,j} = 66.034$$

$$m_n_Q_analit := \text{mean}(n_Q_j) = 66.034$$

$$\text{mean}(n_Q) = 66.033$$

График МОЖ текущего значения очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q в j -ом прогоне модели



$$\sqrt{\frac{1}{N \cdot M} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{M-1} (t_{\text{zad}_{i,j}} - m_{t_{\text{zad_analit}}})^2} = 5.493$$

$$\sigma_{t_{\text{zad_analit}}} := \text{stdev}(t_{\text{zad}}) = 5.493$$

СКО текущего значения очереди пакетов, ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q в одном прогоне модели

$$\sigma_{n_Q \text{ analit}_j} := \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (n_{Q_{i,j}} - m_{n_Q \text{ analit}})^2}$$

СКО текущего значения очереди пакетов, ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q в M-прогонах модели

$$\sqrt{\frac{1}{N \cdot M} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{M-1} (n_{Q_{i,j}} - m_{n_Q \text{ analit}})^2} = 99.143$$

$$\sigma_{n_Q \text{ analit}} := \text{stdev}(n_Q) = 99.142$$

График СКО значений времени задержки преобразования пакета $T_{\text{зад}}$ в j-ом прогоне модели

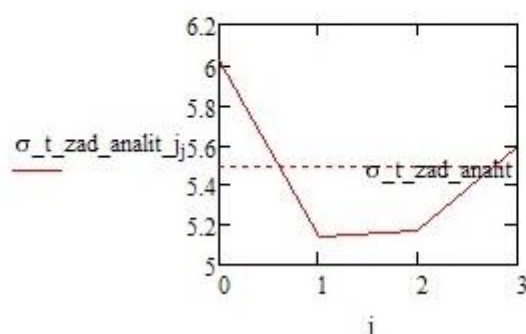
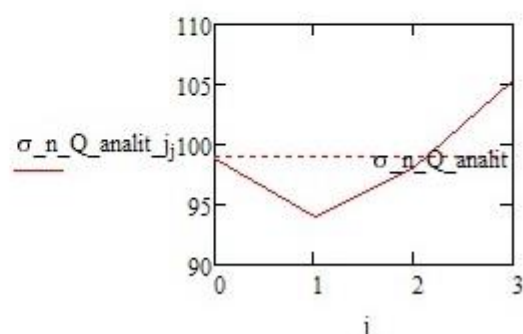


График СКО текущего значения очереди пакетов n_Q , ожидающих отправки в буфере памяти объемом Q в j-ом прогоне модели



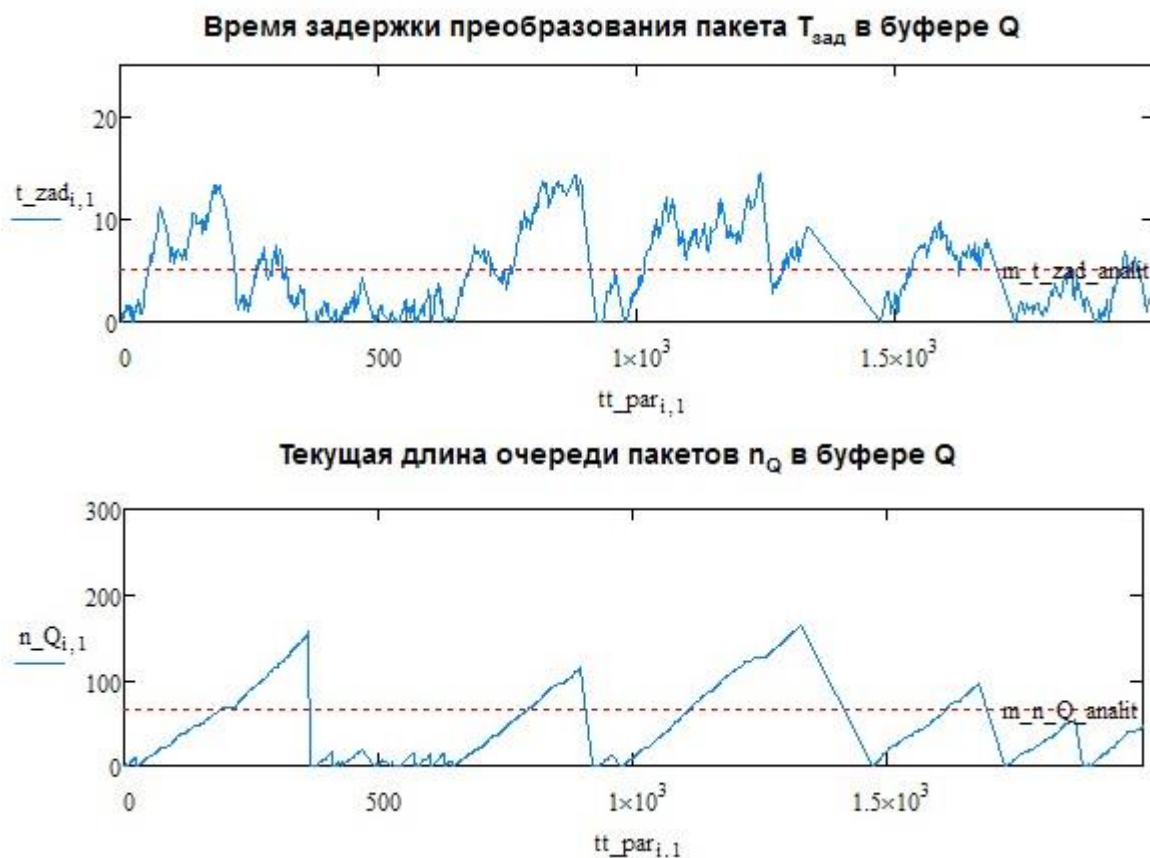
Объем буфера памяти Q

$$Q := 1400$$

Вероятность отказа в обслуживании пакета при наличии буфера объемом Q

$$p_Q := \frac{1}{N \cdot M} \cdot \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=1}^N \text{if}(n_{Q_{i,j}} > Q, 1, 0)$$

$$p_Q = 0$$



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 Р. Т., Король В. В. Анализ характеристик мультимедийного трафика в локальных вычислительных сетях // Имитационное моделирование. Теория и практика. 2003. Т. 1. С. 45-49.
8. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69-79.
9. Рыжиков Ю. И. Расчет систем обслуживания с групповым поступлением заявок // Информационно-управляющие системы. 2007. № 2. С. 39-49.
10. Рыжиков Ю. И. Полный расчет системы обслуживания с распределениями Кокса // Информационно-управляющие системы. 2006. № 2. С. 38-46.
11. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации. – СПб.: ВАС, 2011. – 476 с.
12. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
13. Чакрян Е. А. Многомерные стохастические и имитационные модели телетрафика и каналов передачи данных в условиях помех. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.18. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2009. 18 с.
14. Цыбаков Б. С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. 1999. Вып. 5. С. 24-31.
15. 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.
16. Малофей О. П., Фомин Л. А., Родионов В. В., Ряднов Д. С. Моделирование самоподобного трафика при построении сетей NGN // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. № 11. С. 176-186.
17. Агеев Д. В., Игнатенко А. А., Копылев А. В. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия // Проблемы телекоммуникаций. 2011. № 3(5). С. 18-37.
18. Дейнеко Ж. В., Замула А. А., Кириченко Л. О., Радивилова Т. А. Об одном методе моделирования самоподобного стохастического процесса // Вісник Харківського національного університету. 2010. № 890. С. 53-63.
19. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 380 с.
20. Шелухин О. И., Иванов Ю. А., Пастухов А. С. Исследование влияния самоподобия ON-OFF источников на скорость интернет-трафика // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2008. Т. 4. № 1-2. С. 97-100.

21. Привалов А. Ю., Баева М. В. Моделирование самоподобного трафика // Известия самарского научного центра российской академии наук. 2006. Т. 8. № 4. С. 1041-1046.
22. Привалов А. Ю., Благов А. В. Об использовании некоторых моделей самоподобного сетевого трафика в имитационном моделировании // Математическое моделирование. 2011. Т. 23. № 7. С. 114-128.
23. Ушанев К. В. Имитационная модель формирования трафика сложной структуры // Информационные технологии моделирования и управления. 2014. № 3(87). С. 263-272.
24. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и Техника. 2004. – 336 с.
25. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: «Поликом», 2010. – 389 с.
26. Линец Г. И., Фомин Л. А., Скоробогатов С. А. Снижение влияния самоподобности трафика в пакетных сетях // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 11. С. 38-42.
27. Линец Г. И., Фомин Л. А., Скоробогатов С. А., Криволапов Р. В. Способ снижения влияния самоподобности в сетевых структурах и устройство для его осуществления // Патент на изобретение № 2413284. 27.02.2011 г.
28. Линец Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности. Автореф. дис. ... докт. техн. наук по спец. 05.13.01. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2013. 34 с.
29. Линец Г. И., Фомин Л. А., Говорова С. В., Меденец В. В. Построение мультисервисных сетей на основе функциональных преобразований трафика // «Инфокоммуникационные технологии». 2014. Т. 12. № 4. С. 40-45.

References

1. Bakhareva N. F., Kartashevskii I. V., Tarasov V. N. Analiz i raschet nepuassonovskih modelej trafika v setjah 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. Obobshhennaja dvumernaja diffuzionnaja model' massovogo obsluzhivaniya tipa [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 nagruzkoy na seti JeVM 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. Matematicheskaja model' trafika s tjazhelohvostnym raspredeleniem na osnove sistemy massovogo

obslyzhivaniya [The Mathematical Model of Traffic with Heavy Tail Distribution on the Basis of Queuing System Type of $H_2/M/1$]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 36-41 (in Russian).

5. Makarenko S. I. Analiz matematicheskikh modelej informacionnykh potokov obshhego vida i stepeni ih sootvetstviya trafiku setej integral'nogo obslyzhivaniya [Analyzing of Mathematical Models of General Type Data Streams and Degree of Their Conformity to Integral Service Net Traffic]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 28-35 (in Russian).

6. Makarenko S. I. Prednamerennoe formirovanie informacionnogo potoka slozhnoy struktury za schet vnedreniya v sistemu svyazi dopolnitel'nogo imitacionnogo trafika [Premeditated Formation of the Traffic of Difficult Structure Due to Implementation in the Communication System of Additional Imitative Traffic]. *Voprosy Kiberbezopasnosti*, 2014, no. 3(4), pp. 7-13 (in Russian).

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

8. Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Ocenka ustojchivosti seti svyazi v usloviyakh vozdeystviya na nee destabilizirujushhih faktorov [Estimating Communication Network Stability Under the Conditions of Affecting Destabilization Factors on It]. *Radioengineering and Telecommunication Systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (in Russian).

9. Ryzhikov Y. I. Raschet sistem obslyzhivaniya s gruppovym postupleniem zajavok [Calculation of Systems of Service with Group Receipt of Demands]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2007, no. 2, pp. 39-49 (in Russian).

10. Ryzhikov Y. I. Polnyj raschet sistemy obslyzhivaniya s raspredelenijami Koksa [Full Calculation of System of Service with Cox's Distributions]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 2, pp. 38-46 (in Russian).

11. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevyy sintez informacionno-telekommunikacionnykh sistem. matematicheskie modeli i metody optimizacii* [Multilevel Synthesis of Information and Telecommunication Systems. Mathematical Models and Methods of Optimization]. Saint-Petersburg, Military Academy of Communications, 2011. 476 p. (in Russia).

12. 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 Russia).

13. Chakrian E. A. *Mnogomernye stohasticheskie i imitacionnye modeli teletrafika i kanalov peredachi dannykh v usloviyakh pomeh*. Dis. kand. tehn. nauk. [Multidimensional Stochastic and Imitating Models of a Teletraffic and Data Links in the Conditions of Hindrances. Ph.D. Tesis]. Rostov-on-Don, Rostov State Transport University, 2009. 18 p. (in Russian).

14. Tsibakov B. S. Model' teletrafika na osnove samopodobnogo sluchajnogo processa [Teletraffic Model on the Basis of Self-Similar Casual Process] *Radiotekhnika*, 1999, no. 5, pp. 24-31 (in Russian).

15. Makarenko S. I. Analiz matematicheskikh modelej informacionnyh potokov obshhego vida i stepeni ih sootvetstvija trafiku setej integral'nogo obsluzhivaniya [Analysis of Mathematical Models of Information Streams of a General View and Degree of Their Compliance to a Traffic of Networks of Integrated Service]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no 8, pp. 28-35 (In Russian).

16. Malofej O. P., Fomin L. A., Rodionov V. V., Rjadnov D. S. Modelirovanie samopodobnogo trafika pri postroenii setej NGN [Modeling of a Self-Similar Traffic at Creation of the NGN Networks]. *Izvestiya Southern Federal University. Engineering Sciences*, 2009, no. 11, pp. 176-186 (In Russian).

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

18. Dejneko Zh. V., Zamula A. A., Kirichenko L. O., Radivilova T. A. Ob odnom metode modelirovaniya samopodobnogo stohasticheskogo processa [About One Method of Modeling of Self-Similar Stochastic Process]. *The Journal of V.N.Karazin Kharkiv National University*, 2010, no. 890, pp. 53-63 (in Russian).

19. Ryzhikov Y. I. Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i tekhnologii. [Imitating Modeling. Theory and Technologies]. Saint Petersburg, Korona print Publ., 2001. 380 p. (in Russian).

20. Sheluhin O. I., Ivanov Y. A., Pastuhov A. S. Issledovanie vlijanija samopodobija ON-OFF istochnikov na skorost' internet-trafika [Research of Influence of Self-similarity of ON-OFF of Sources on Internet Traffic Speed]. *Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*, 2008, vol. 4. no. 1-2, pp. 97-100 (in Russian).

21. Privalov A. Y., Baeva M. V. Modelirovanie samopodobnogo trafika [Modeling of a Self-Similar Traffic]. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra rossijskoj akademii nauk*, 2006, vol. 8, no. 4, pp. 1041-1046 (in Russian).

22. Privalov A. Y., Blagov A. V. Ob ispol'zovanii nekotorykh modelej samopodobnogo setevogo trafika v imitacionnom modelirovanii [About Use of Some Models of a Self-Similar Network Traffic in Imitating Modeling]. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2011, vol. 23, no. 7, pp. 114-128 (in Russian).

23. Ushanev K. V. Imitacionnaja model' formirovaniya trafika slozhnoj struktury [Imitating Model of Formation of a Traffic with Structural Complexity]. *Information technologies of modeling and control*, 2014, no. 3(87), pp. 263-272 (in Russian).

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

25. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sledujushhego pokoleniya* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (in Russian).

26. Linec G. I., Fomin L. A., Skorobogatov S. A. Snizhenie vlijanija samopodobnosti trafika v paketnyh setjah [Lowering of Influence of Self-Similitude of Traffic on Package Networks]. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*, 2008, no. 11, pp. 38-42 (in Russian).

27. Linec G. I., Fomin L. A., Skorobogatov S. A., Krivolapov R. V. *Sposob snizhenija vlijanija samopodobnosti v setevykh strukturah i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [The Way of Lowering Self-Similitude on Network Structures and the Device for Its Realization]. Patent Russia, no. 2413284, 27 February 2011. (in Russian).

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

29. Linec G. I., Fomin L. A., Govorova S. V., Medenec V. V. *Postroenie mul'tiservisnyh setej na osnove funkcional'nyh preobrazovanij trafika* [Creation of Multiservice Networks on the Basis of the Functional Transformations of Traffic]. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 40-45 (in Russian).

Статья поступила 1 мая 2015 г.

Информация об авторах

Ушанев Константин Владимирович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: способы обеспечения качества обслуживания трафика сложной структуры. Тел.: +7 981 832 34 84. E-mail: stan_007@mail.ru

Макаренко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. Тел.: +7 981 820 49 90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

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

Analytical- Simulation Model of Functional Conversion of Complex Traffic

Ushanev K. V., Makarenko S. I.

Problem statement: Structural complexity as the property of the network connection traffic updates the issues of sustainability of their operation by improving the timeliness of traffic in network nodes. Known methods of increasing sustainability which are based on adapting the communications network node equipment to the traffic parameters, are well studied and described in the literature. Methods of increasing sustainability which are based on adapting of traffic to the network parameters are less studied. **The aim** of this research is to increase the sustainability of communication networks by conversion of structural complexity traffic to a traffic corresponding to the elementary stream. The criterion of traffic structural complexity is the coefficient of variation of time intervals between packages. As a model of traffic with structural complexity used the stream having Pareto distribution and the coefficient of variation more than one. **The method used:** conversion of traffic structure is based on use of the known scientific and methodical device of functional conversion of laws of density of probability. **Novelty** of this issue is the accounting of indicators of time of a delay when conversion a traffic and probability of refusal in service of a package because of overflow of the buffer when performing transformation. **Result:** the presented decision will allow to prove the volume of the buffer and value of intensity of sending packages of the converted traffic taking into account the above indicators of process of conversion. Justification of these parameters will be used when developing the converter of a traffic. **The practical significance.** The converter as a part of the nodal equipment in a communication network will allow to increase timeliness of service of the converted traffic in comparison with a traffic of complex structure by 6-8 times. It will lead to growth of stability of a network on the values proportional to timeliness increase.

Key words: communications network, traffic, structural complexity of traffic, conversion of traffic structure, quality of service.

Information about Authors

Ushanev Konstantin Vladimirovich – 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: structural complexity of the traffic; conversion of traffic structure; coefficient of variation of time intervals between packages. Tel.: +7 981 832 34 84. E-mail: stan_007@mail.ru

Makarenko Sergey Ivanovich – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. Tel.: +7 981 820 49 90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

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

УДК 004.057.4

Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети

Макаренко С. И.

Постановка задачи: увеличение структурной сложности сетей связи и рост интенсивности передаваемого трафика актуализирует вопросы обеспечения устойчивости сетей к отказам ее отдельных элементов - каналов и узлов связи. Проведенный анализ статистики причин отказов в сетях показал, что до 70% отказов обусловлены старением телекоммуникационного оборудования, 20% - некорректными операциями технического обслуживания, 17% - сбоями в программном обеспечении. При возникновении сетевого отказа протоколы маршрутизации должны обеспечить его корректную обработку, особенно если он ведет к изменению топологии сети, причем сделать это с минимальными временными затратами. **Целью работы** является анализ времени сходимости сети и оценка влияния на данное время различных факторов: временных параметров протоколов маршрутизации, сложности топологии сети, пропускной способности каналов связи и загрузки сети. **Используемые методы.** Анализ времени сходимости сети проводился на основе имеющихся публикаций по итогам исследований в этой предметной области. Проведен анализ статистики отказов и причин их возникновения. Проведен анализ протоколов, получивших распространение для внутридомашней маршрутизации. Показано, что наилучшие показатели по обеспечению сходимости сети обеспечивают протоколы на основе анализа состояния каналов, в связи с чем именно они были выбраны для дальнейшего рассмотрения. Проведен анализ временных параметров протокола маршрутизации и принципов его функционирования при отказе в сети, которые влияют на время сходимости. На основе этого анализа, рассмотрены и классифицированы основные технологические и протокольные решения, применяемые разработчиками сетевого оборудования для снижения времени сходимости. Представлен обзор результатов исследований времени сходимости сети для различных протоколов маршрутизации, топологий сетей и настроек временных параметров протоколов. Проведен сравнительный анализ значений времени сходимости при моделировании сетевых отказов в среде OPNET и проведении экспериментов на реальном телекоммуникационном оборудовании. В заключении статьи, на основе научных работ последних лет, проведен анализ направлений совершенствования протоколов маршрутизации в части улучшения их устойчивости к отказам в сети и снижения времени сходимости. **Новизна.** Элементом новизны работы является результаты обобщенного анализа принципов функционирования протоколов маршрутизации и влияния их временных параметров на время сходимости сети. Также к элементу новизны стоит отнести теоретическое обобщение направлений совершенствования протоколов маршрутизации в части улучшения их устойчивости к отказам в сети и снижения времени сходимости. **Результаты и их значимость.** Результаты обобщенного анализа принципов функционирования протоколов маршрутизации, а также влияния их временных параметров на время сходимости сети могут быть использованы для обоснования новых алгоритмических решений при маршрутизации трафика в сетях, на которые воздействуют различного рода дестабилизирующие факторы. Представленный в работе анализ перспективных направлений совершенствования протоколов маршрутизации может быть использован для совершенствования таких протоколов как: OSPF, OSPF-TE, IS-IS, IGRP, EIGRP. Кроме того, ряд рассматриваемых в статье решений может быть положен в основу разработки протоколов маршрутизации для мобильных MANET сетей, построенных на основе Mesh-технологий.

Ключевые слова: маршрутизация, внутридомашняя маршрутизация, сходимость сети, время конвергенции, отказ в сети, OSPF, OSPF-TE, IS-IS, IGRP, EIGRP, MANET.

Актуальность

Развитие современных сетей связи, высокие скорости передачи информации, а также высокие требования к надежности и устойчивости сетей актуализируют исследование процессов восстановления сетей после отказов.

Несмотря на то, что современное активное сетевое оборудование относится к высоконадежным элементам, отказы в сетях не так уж редки.

Проведенный анализ работ [1, 2] показал, что признаки отказов в сетях можно классифицировать по следующим пересекающимся группам:

- 45%...70% - естественное старение элементов аппаратного обеспечения маршрутизаторов (в первую очередь износом интерфейсных плат) [2];
- 20% - некорректные операции технического обслуживания [2];
- 17% - сбои в программном обеспечении маршрутизаторов [2, 3];
- 16% - сбоями в электропитании [3];
- применительно к транспортным сетям 84% отказов в них обусловлены сбоями оптического оборудования [4].

Каждый отказ в сети ведет к прекращению информационного обмена на десятки секунд. С учетом высоких скоростей передачи, это вызывает потери гигабит данных, и, как следствие, существенно снижает готовность сети.

Проведенный анализ работ отечественных авторов показал, что повышение устойчивости сетей связи к отказам ее элементов за счет реконфигурации информационных потоков и повышения эффективности протоколов маршрутизации является актуальной прикладной задачей. По данному направлению исследований ведут работу следующие ученые: Поповский В.В. [5-7], Лемешко А.В. [7-9], Романюк А.А. [9], Попков В.К. [10, 11], Блукке В.П. [11], Сорокин А.А. [12, 13], Дмитриев В.Н. [12, 13], Перепелкин Д. А. [14-17], Корячко В. П. [17], Мейкшан В.И. [18], Пасечников И.И. [19, 20], Громов Ю.Ю. [21], Ковальков Д.А. [22], Горбунов И.Э. [23], Егунов М. М. [24], Шувалов В. П. [24]. Однако в работах этих ученых не рассматриваются временные параметры реакции протокола маршрутизации на отказ в сети, не детализируются процессы реконфигурации маршрутов, а основное внимание уделяется топологическим аспектам устойчивости сетей.

Проведенный автором анализ научных работ показал, практически полное отсутствие подробных исследований реакции протокола маршрутизации на отказы в сети, которые бы были опубликованы на русском языке. Поэтому основная часть представленного в работе анализа основана на публикациях зарубежных авторов. В рамках данной работы рассмотрены процессы реакции сети на отказы каналов связи и узлового оборудования в пределах одной автономной области маршрутизации, поэтому в ней анализируются только протоколы внутридоменной динамической маршрутизации. Работа развивает ранее опубликованные исследования автора в области анализа реакции протоколов OSPF [25] и EIGRP [26] на отказы в сети.

В общем случае протоколы внутридоменной динамической маршрутизации основаны на алгоритмах, которые можно отнести к одной из двух групп:

- дистанционно-векторные алгоритмы (DVA - Distance Vector Algorithm);
- алгоритмы состояния каналов (LSA - Link State Algorithm).

В протоколах на основе DVA каждый маршрутизатор периодически и широковещательно рассылает по сети сообщения, содержащие вектор, компонентами которого являются расстояния, измеренные в той или иной метрике от данного маршрутизатора до всех известных ему сетей. Получив от некоторого соседа вектор расстояний (дистанций) до известных тому сетей, маршрутизатор наращивает компоненты вектора на величину расстояния от себя до данного соседа. Обновленное значение вектора маршрутизатор рассылает своим соседям. Таким образом, в результате широковещательной рассылки каждый маршрутизатор узнает через смежные с ним маршрутизаторы информацию обо всех имеющихся в составной сети подсетях и о расстояниях до них. Дистанционно-векторные алгоритмы устойчиво функционируют только в небольших сетях. В больших сетях они могут загружать линии связи интенсивным широковещательным трафиком. Кроме того, изменения топологии сети могут не всегда корректно обрабатываться протоколами этого типа, так как маршрутизаторы не имеют точного представления о топологии связей в сети, а располагают только косвенной информацией - вектором расстояний. К протоколам на основе DVA относятся: RIP, IGRP, EIGRP (гибридный), AODV.

В протоколах на основе LSA каждый маршрутизатор обладает данными о топологии сети. Используя данные о топологии, он вычисляет дерево кратчайших путей SPT (Shortest Path Tree) и на основе него составляет таблицу маршрутизации. Вычисление SPT ведется за счет использования алгоритма поиска кратчайших путей SPF (Shortest Path First), который, как правило, основан на алгоритме Дейкстры. В протоколе на основе состояния каналов предусмотрен регулярный обмен сообщениями о состоянии (метрике) канала связи и коррекции топологии сети. Вследствие того, что протоколы изначально ориентированы на учет данных о всей топологии сети, данный тип протоколов является гораздо более устойчивым. При этом протоколы на основе LSA обеспечивают меньшее время сходимости по сравнению с дистанционно-векторными протоколами маршрутизации. К протоколам на основе относятся IS-IS и OSPF.

Основные параметры протоколов внутридоменной динамической маршрутизации, а также междоменного протокола BGP (Border Gateway Protocol), представлены в таблице 1 по данным из работы [27].

Анализ функционирования протоколов внутридоменной динамической маршрутизации показал, что, несмотря на ряд различий, касающихся вычисления метрики путей в сети и алгоритмических подходов к вычислению кратчайших путей, общие принципы их функционирования применительно к реакции на отказы каналов весьма схожи. В связи с тем, что протоколы маршрутизации на основе алгоритмов состояния каналов обладают лучшими характеристиками по времени сходимости, в данной работе будет рассмотрен протокол OSPF, как наиболее распространенный представитель LSA протоколов. Кроме того, будет уделено внимание проприетарному гибриднему протоколу EIGRP, обеспечивающему быстрое восстановление сети при отказах каналов связи.

Таблица 1 - Сравнительная таблица основных характеристик протоколов динамической маршрутизации [27]

Показатели/ протоколы	RIP v.2	IGRP	EIGRP	IS-IS	OSPF	BGP v.4
Безопасность	Открытый пароль или аутентификация по ключу MD5	–	Аутентификация по ключу MD5	–	Открытый пароль или аутентификация по ключу MD5	Разные методы аутентификации
Тип алгоритма	Вектор расстояния	Вектор расстояния	Комбинированный	Состояние каналов связи	Состояние каналов связи	Вектор расстояния
Балансировка нагрузки	–	Разные метрики	Разные метрики	Одинаковые метрики	Одинаковые метрики	Разные метрики (полу-автоматически)
Объединение маршрутов	–	–	+	–	+	+
Маски подсетей переем. длины	+	–	+	–	+	+
Максимальное количество маршрутизаторов в сети	15	255 (реком. <50)	255	1024	65534	65534
Учет в метрике различных характеристик пути	Одна основная	Комбинированная	Комбинированная	Одна основная и три дополнительные	Одна основная и три дополнительные	Произвольная
Поддержка QoS	–	+	+	+	+	–
Обновления маршрутной информации	Вся таблица	Вся таблица	Только изменения	Только изменения	Только изменения	Только изменения
Необходимость логической подготовки сети	–	–	–	Выделение центральной области и связанных областей	Выделение центральной области и связанных областей	Разбитие сети на автономные системы и описание взаимодействия между ними
Доступность реализации	Открытый	Только на оборудовании Cisco Systems	Только на оборудовании Cisco Systems	Открытый	Открытый	Открытый
Поддержка IPv6	–	–	+	–	+	+

Анализ временных параметров протокола маршрутизации, определяющих время сходимости

Проведем исследование временных параметров, определяющих реакцию протокола маршрутизации на основе состояния каналов на сетевой отказ на примере протокола OSPF. Анализ работ [1, 28-30] позволил выявить основные параметры, влияющие на время сходимости в сети.

Процесс сходимости в сети состоит из следующих основных операций [1]:

- 1) обнаружение отказа элемента сети;
- 2) генерирование нового LSA-сообщения для оповещения о произошедшем изменении;
- 3) лавинная рассылка LSA-сообщений в сети;

- 4) выполнение алгоритма поиска кратчайших путей SPF на каждом маршрутизаторе, который получает LSA-сообщения;
- 5) обновление таблиц маршрутизации RIB/FIB на каждом маршрутизаторе по итогам пересчета SPF.

Время сходимости (*Convergence_Time*) определяется в соответствии с выражением [28]:

$$\begin{aligned} \text{Convergence_Time} = & \text{Failure_Detection_Time} + \\ & + \text{LSA_Generation_Time} + \text{Event_Propagation_Time} + \\ & + \text{SPF_Run_Time} + \text{RIB_FIB_Update_Time}, \end{aligned}$$

где:

- *Failure_Detection_Time* - время, необходимое для обнаружения отказа;
- *LSA_Generation_Time* – время генерации и начала рассылки LSA-сообщения об отказе элемента сети и изменении топологии;
- *Event_Propagation_Time* - время, необходимое для распространения LSA-сообщений о топологии всем маршрутизаторам в сети;
- *SPF_Run_Time* - время, необходимое для запуска алгоритма поиска кратчайших путей SPF после получения новых LSA-сообщений;
- *RIB_FIB_Update_Time* - время, необходимое для выполнения алгоритма SPF и обновления таблиц маршрутизации RIB/FIB.

Данные временные параметры, в свою очередь, определяются временными параметрами более низкого уровня, в связи с чем рассмотрим их более подробно.

Время, необходимое для обнаружения отказа на физическом уровне (*Failure_Detection_Time*). Для проверки работоспособности каналов связи и отношений собственной смежности маршрутизаторы обмениваются сообщениями Hello. В случае неполучения очередного Hello-пакета по какому-либо каналу связи, маршрутизатор переводит данный канал в режим ожидания восстановления связи. В случае если в течение времени *Dead_Interval* потеряны несколько Hello-пакетов подряд, то канал считается отказавшим и маршрутизатор генерирует LSA-сообщение об отказе канала. Таким образом, своевременность обнаружения отказа канала связи определяется следующими параметрами [28, 30, 32]:

- *Hello_Interval* – интервал обмена Hello-пакетами между смежными маршрутизаторами;
- *Dead_Interval* – интервал времени, в течение которого маршрутизатор ожидает восстановления связи в канале (получения очередного Hello-пакета). По истечению данного времени смежный маршрутизатор по данному каналу считается недоступным. Данный интервал, как правило, кратен значению *Hello_Interval*.

Значения OSPF по умолчанию: *Hello_Interval*=10 с, *Dead_Interval*=4·*Hello_Interval*=40 с.

При использовании способа обнаружения отказов на основе пакетов Hello, максимальное время обнаружения отказа равно *Hello_Interval*. Для сокращения времени обнаружения отказа зачастую применяют средства

обнаружения канального или даже физического уровня. Данные способы будут рассмотрены ниже.

Время генерации и начала рассылки LSA-сообщения (*LSA_Generation_Time*). Если наступает событие, требующее генерации LSA-сообщения, то, первоначально, формирование этого сообщения будет задержано на временной интервал *Initial_Interval*. Когда это время истечет, LSA-сообщение будет сгенерировано, и запустится таймер хранения *Hold_Timer*. Любые события, связанные с изменением топологии сети в пределах интервала хранения *Hold_Timer*, не будут приводить к формированию нового LSA. Вместо этого эти события накапливаются, а единственное LSA-сообщение будет сгенерировано по окончании *Hold_Timer*. Таким образом таймеры *Initial_Interval* и *Hold_Timer* гарантируют, что если канал отказал и снова восстановился, то LSA сообщения, которые должны были сообщить смежным маршрутизаторам о пропадании канала, не будут отправлены, и процесс пересчета алгоритма SPF у других маршрутизаторов сети не будет запущен. Если после отправки LSA-сообщения о первоначальном изменении топологии в сети продолжают изменяться, то маршрутизатор будет увеличивать интервал хранения *Hold_Timer* по экспоненте [28, 30]:

$$Hold_Timer = 2^{t \cdot Hold_Timer},$$

пока он не достигает предварительного определенного значения *Max_Wait*. В этом случае время хранения *Hold_Timer* больше не будет увеличиваться и будет равно *Max_Wait* при любой динамике изменения топологии сети. В случае когда в течение интервала $2 \cdot Max_Wait$ событий, приводящих к генерации LSA-сообщений не происходит, то таймер хранения *Hold_Timer* сбрасывается к своему начальному значению. Необходимо отметить, что интервал хранения должен примерно равняться (или немного превышать) полное время сходимости сети так, чтобы все маршрутизаторы успели отработать новые изменения топологии прежде, чем придет следующее LSA-сообщение [30].

Текущие значения интервалов распространяются по сети с помощью Hello-пакетов [33].

Таким образом, параметрами генерации и отправки LSA-сообщений являются [30]:

- *Initial_Interval* - время задержки перед отправкой LSA-сообщения;
- *Hold_Timer* - время, по истечении которого LSA-сообщение будет отправлено другим маршрутизаторам если других изменений топологии не произошло;
- *Max_Wait* – максимальное значение интервала ожидания *Hold_Timer*.

Оборудование Cisco по умолчанию использует значения *Initial_Interval*=10 мс, *Hold_Timer*=100 мс, *Max_Wait* =5000 мс.

Для контроля процесса лавинной рассылки сообщений LSA об обновлениях топологии в сетевом оборудовании (в IOS и в JunOS), в протоколах маршрутизации предусмотрены специальные временные параметры [30].

Смежным маршрутизаторам, как правило, отправляются два LSA сообщения с задержкой *Min_LS_Interval*. Так как лавинная рассылка LSA

должна является надежным процессом, то требуется подтверждения о приемах LSA-сообщений. В случае отсутствия таких подтверждений об успешном приеме, LSA-сообщения рассылаются снова после истечения таймера повторной передачи $Rxmt_Interval$.

Для протокола OSPF значениями по умолчанию являются: $Min_LS_Interval = 1$ с, $Rxmt_Interval = 5$ с [37].

Flood_packet-pacing_timer – устанавливает время задержки перед отправкой следующего LSA-сообщения после ранее отправленного.

Retransmission packet-pacing timer (Rxmt_Interval) – устанавливает время задержки перед повторной отправкой сообщения LSA, в случаях, если на ранее отправленное сообщение не пришло подтверждение об его успешном получении. В более усовершенствованной реализации данного таймера, предусмотренной RFC 4222 [34], реализован механизм повторной передачи за счет динамического изменения параметра $Min_LS_Interval$. В соответствии с RFC 4222 таймер $Rxmt_Interval$ экспоненциально увеличивается каждый раз, когда число неподтвержденных сообщений LSA в очереди для повторной передачи превышает заданный порог (например, во время перегрузки сети). При успешном получении подтверждений о доставке LSA сообщений, интервал $Rxmt_Interval$ снова сбрасывается к своему начальному значению.

Group packet-pacing timer. В протоколе OSPF ver. 2 для плановой коррекции таблиц маршрутизации предусмотрена массовая рассылка LSA сообщений каждые 30 мин. Такая рассылка сильно нагружает сеть, и в оборудовании Cisco предусмотрена задержка (по умолчанию 240 мс), на значение которой каждый из маршрутизаторов задерживает отправку своего LSA сообщения. Таким образом, формируется групповая рассылка, в которой сообщения LSA следуют с интервалом в 240 мс [35].

Время распространения LSA-сообщений о топологии всем маршрутизаторам в сети (*Event_Propagation_Time*). Время лавинного распространения информации о топологических изменениях в сети посредством пересылки LSA-сообщений может существенно варьироваться в зависимости от пропускной способности каналов связи. Таким образом, приблизительно время распространения можно оценить следующим образом:

- при учете средней связности сети:

$$T_{LSA} = \frac{\lambda_{LSA} D_{LSA} R S}{\sum_i^N C_i};$$

- без учета связности сети

$$T_{LSA} = \frac{\lambda_{LSA} D_{LSA} R}{\frac{1}{N} \sum_i^N C_i};$$

где: T_{LSA} – время распространения LSA-сообщений по сети [с]; λ_{LSA} – интенсивность отправки пакетов LSA [пак./с]; D_{LSA} – длина пакета LSA [бит]; R – средняя длина маршрута в сети, выраженная в количестве каналов связи; S – показатель связности узлов, определяемый средним числом каналов связи

смежных узлу; C_i – пропускная способность i -го канал связи в сети [бит/с]; N – количество каналов связи в сети.

Время распространения LSA-сообщений по сети в зависимости от различных факторов исследовалось в работах [36, 37].

Исследование, проведенное в работе [36], на сети, состоящей из 87 маршрутизаторов и 161 канала связи, показало следующий эффект. В случае если LSA-сообщения отправляются немедленно после обнаружения отказа, то время их распространения по сети определяется пропускной способностью каналов связи и составляет 0,01...0,05 с (рис. 1). Однако, если отправка LSA сообщений ведется в соответствии в вышеуказанными таймерами, то время достижения LSA сообщениями всех маршрутизаторов сети существенно зависит от временных параметров *Hello Interval* и *Min_LS Interval* (рис. 2).

Как показывает анализ результатов исследования [36], представленные на рис. 2, в подавляющем числе случаев (более 95%) при различных значениях временных параметров обнаружения отказа и рассылки LSA время достижения LSA сообщениями других маршрутизаторов сети практически совпадает со значением *Hello Interval*.

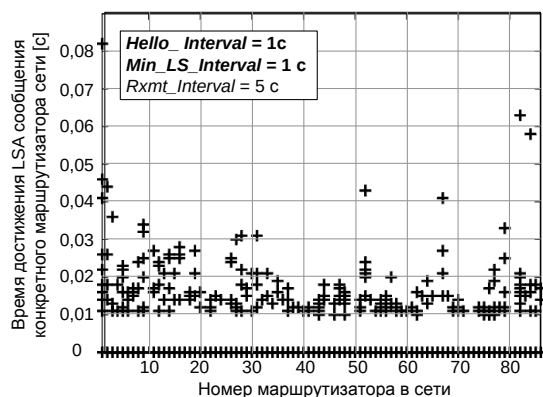
В работе [37] исследованы вопросы распространения LSA сообщений в сетях, построенных на основе низкоскоростных каналов. Показано, что в низкоскоростных каналах возникают перегрузки LSA сообщениями, приводящие к их потере, что, в свою очередь, приводит к лавинообразному нарастанию загрузки и, как следствие, к существенному росту времени сходимости в сети.

Время, необходимое для запуска алгоритма кратчайших путей после получения новых LSA-сообщений (*SPF_Run_Time*). Порядок запуска вычисления SPF определяется временными параметрами, которые предназначены для предотвращения частых вычислений SPF во время рассылок LSA сообщений, следующих с незначительным интервалом.

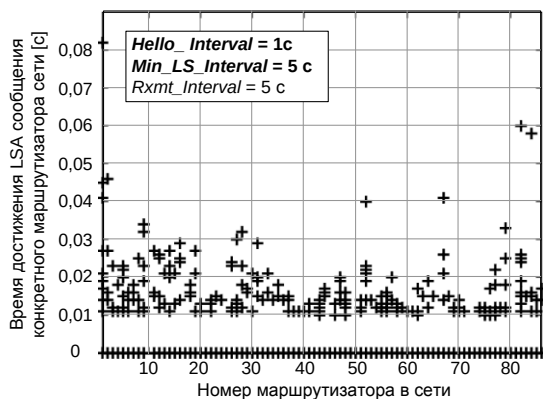
К данным параметрам относятся [30]:

- *SPF_Delay_Timer* - определяет время, которое маршрутизатор должен ожидать прежде чем выполнить вычисление SPF после получения первого LSA в расчете получить большее число LSA сообщений и произвести вычисление SPF с использованием последних данных об изменениях топологии сети;
- *SPF_Hold_Timer* - определяет задержку времени между двумя последовательными вычислениями SPF;

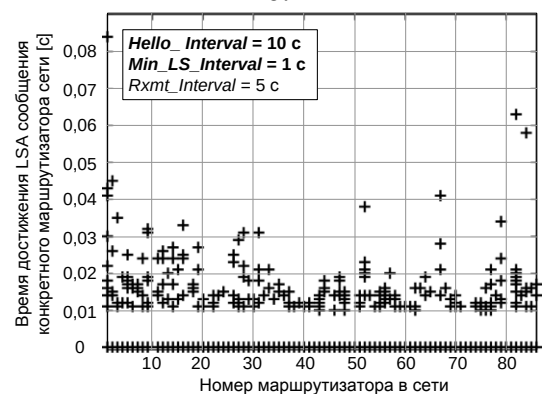
В сети, характеризующейся низкой интенсивностью отказов элементов, параметр *SPF_Hold_Timer* должен иметь малое значение, чтобы обеспечить быструю сходимость сети. В нестабильной сети, которой свойственны частые изменения топологии сети, маленькое значение *SPF_hold_Timer* может привести к частому вычислению алгоритма SPF. В таких сетях предпочтительно накапливать сообщения о нескольких топологических изменениях и обрабатывать их сразу. Для таких сетей рекомендуются большие значения параметров *SPF_Hold_Timer* и *SPF_Delay_Timer* [30].



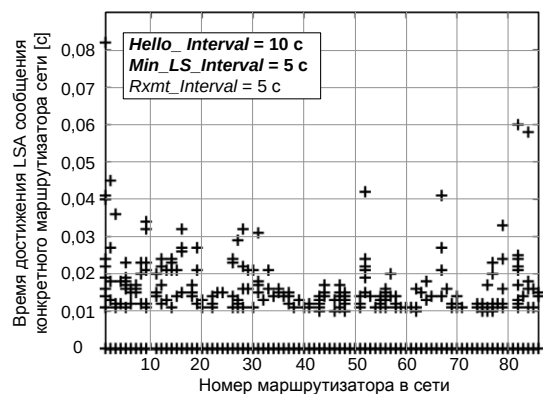
а.



б.

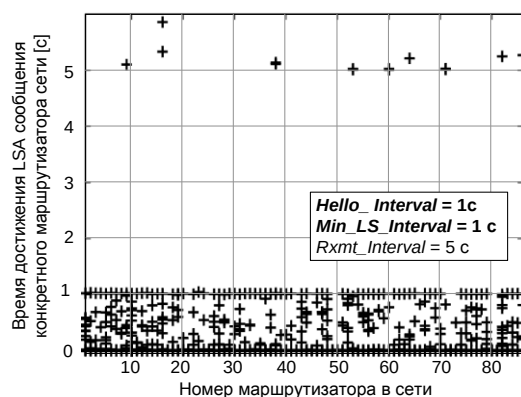


в.

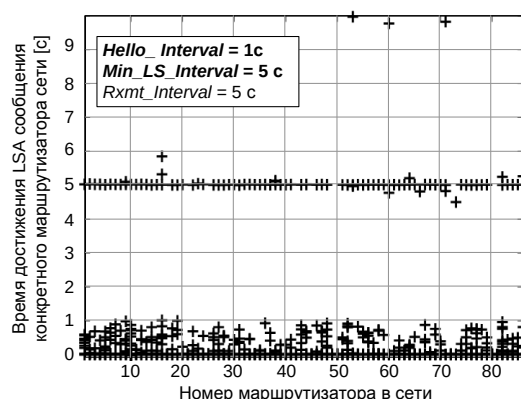


г.

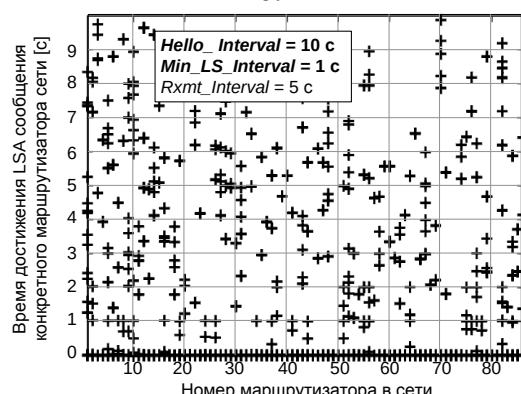
Рис. 1. Время достижения LSA сообщениями маршрутизаторов в сети без учета временных параметров обнаружения отказа и рассылки [36]



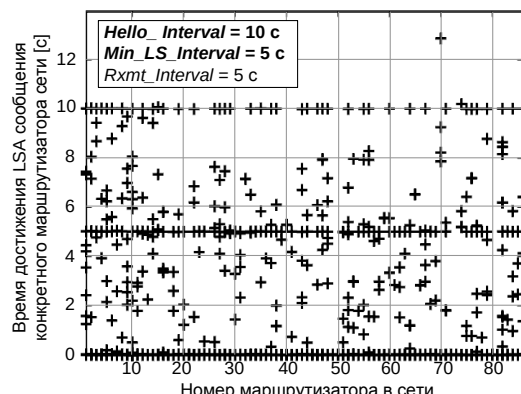
а.



б.



в.



г.

Рис. 2. Время достижения LSA сообщениями маршрутизаторов в сети с учетом временных параметров обнаружения отказа и рассылки [36]

Для протокола OSPF значениями по умолчанию являются: $SPF_Delay_Timer = 5$ с, $SPF_Hold_Timer = 10$ с [37].

В современных маршрутизаторах (например, Cisco, после IOS 12.2 версии) процесс вычисления SPF, как правило, определяется тремя параметрами: $SPF_Start_Interval$, SPF_Hold_Timer и SPF_Max_Wait . Физический смысл этих параметров такой же, как и у аналогичных параметров отправки LSA сообщений [30].

- $SPF_Start_Interval$ - время задержки перед выполнением SPF.
- SPF_Hold - определяет задержку времени между двумя последовательными вычислениями SPF. Данная задержка при выполнении каждого последующего вычисления SPF увеличивается по экспоненциальному закону [30]:

$$SPF_Hold = 2^{t \cdot SPF_Hold},$$

пока не достигает предварительно определенного значения SPF_Max_Wait . В этом случае параметр SPF_Hold больше не будет увеличиваться и будет равен SPF_Max_Wait при любой динамике изменений топологии сети. Когда LSA-сообщения перестают приходить, и вычисления SPF больше не требуются, таймер SPF_Hold сбрасывается в свое начальное значение.

В оборудовании Cisco по умолчанию используются значения $SPF_Start = 10$ мс, $SPF_Hold = 100$ мс, $SPF_Max_Wait = 500$ мс.

Время, необходимое для выполнения алгоритма SPF и обновления RIB/FIB таблиц маршрутизации ($RIB_FIB_Update_Time$). Вычислительная сложность алгоритма Дейкстры, который положен в основу SPF, равна $n \log(n)$ и в очень больших сетях может занять определенное время работы центрального процессора (ЦП) маршрутизатора. После успешного вычисления алгоритма поиска кратчайших путей SPF для тех путей, которые не совпадают с ранее вычисленными значениями, производится обновление таблиц RIB/FIB. Это является конечной целью процесса сходимости сети.

Длительность процесса вычисления алгоритма SPF исследовалась в работах [30, 38].

В работе [38] проведены экспериментальные измерения времени вычисления алгоритма SPF для сети со случайной топологией (моделировались высокопроизводительные платформы Cisco 7200 и Juniper M40). Результаты исследований представлены на рис. 3.

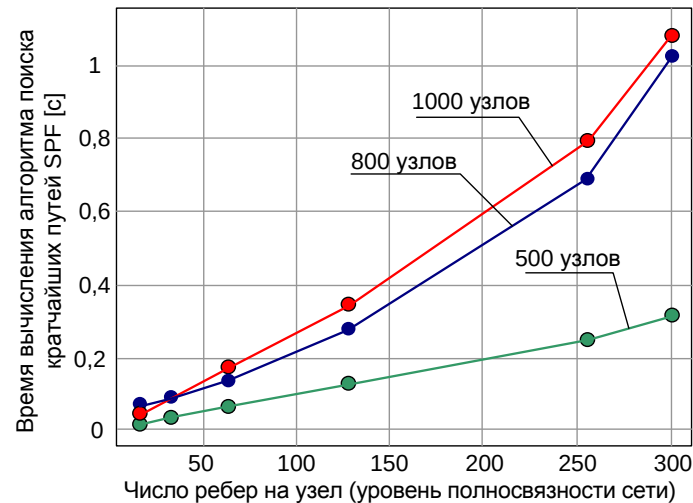


Рис. 3. Экспериментальные измерения времени вычисления SPF для сети со случайной топологией [38]

В работе [30] исследовалась загрузка маршрутизаторов при интенсивном периодическом отказе узла в сети, состоящей из 24 узлов и 49 каналов и использующей протокол OSPF (см. рис. 11). В данном исследовании показано, что даже при интенсивном отказе узла сети и необходимости постоянно пересчитывать SPF загрузка ЦП маршрутизатора не превышает 0,1%, что говорит о достаточности вычислительных возможностей современных маршрутизаторов.

Таким образом, время сходимости в сети зависит от множества параметров и может принимать довольно значительные значения (рис. 4), при этом основной вклад в длительность времени сходимости для конфигураций по умолчанию вносят временные параметры диагностики отказа, а также задержки в рассылке LSA сообщений и вычислении SPF.

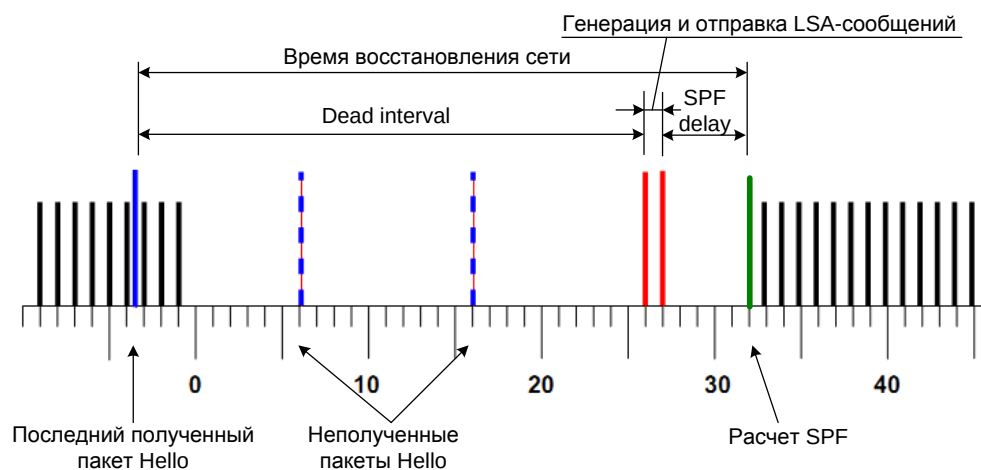


Рис. 4. Схема временных параметров, определяющих время сходимости сети

В таблице 2 приведены обозначения и значения основных временных параметров протокола маршрутизации OSPF, определяющие сходимость сети.

Таблица 2 - Значения временных параметров протокола маршрутизации определяющих сходимость сети для протокола OSPF [30, 37]

Параметры		Обозначение и значение
Временные параметры диагностики отказа	Период рассылки Hello-пакетов, для диагностики состояния смежности сети	$Hello_Interval =$ 10 с (для обычной сети) 30 с (в широковещательной сети)
	Время ожидания восстановления связи после неполучения очередного Hello пакета. По истечении данного времени канал считается отказавшим, а смежный маршрутизатор - недоступным	$Dead_Interval =$ $4 \times Hello_Interval$
Временные параметры отправки сообщений об изменении топологии сети	Время задержки рассылки сообщения об изменении топологии сети	$Initial_Interval = 10$ мс,
	Время, по истечении которого сообщение об изменении топологии будет отправлено другим узлам, если других изменений топологии не произошло	$Hold_Timer = 100$ мс
	Максимальное время $Hold_Timer$	$Max_Wait = 5$ с
	Период следования между двумя последовательно отправляемыми LSA сообщениями об изменении топологии	$Min_LS_Interval = 1$ с
	Время после которого будет произведена повторная рассылка сообщения об изменении топологии, если получение предыдущего сообщения не подтверждено	$Rxmt_Interval = 5$ с
Временные параметры вычисления алгоритма SPF	Задержка запуска алгоритма расчета кратчайших путей после получения очередного сообщения об изменении топологии	$SPF_Delay_Timer = 5$ с
	Время между двумя следующими подряд вычислениями алгоритма расчета кратчайших путей	$SPF_Hold_Timer = 10$ с

На рис. 5 приведена схема, определяющая связь этих временных параметров с состояниями, в которых может находиться маршрутизатор, в соответствии с работой [39]. Такое представление позволяет наглядно оценить взаимосвязь временных параметров в процессе восстановления сети и их влияние на конечное время сходимости.

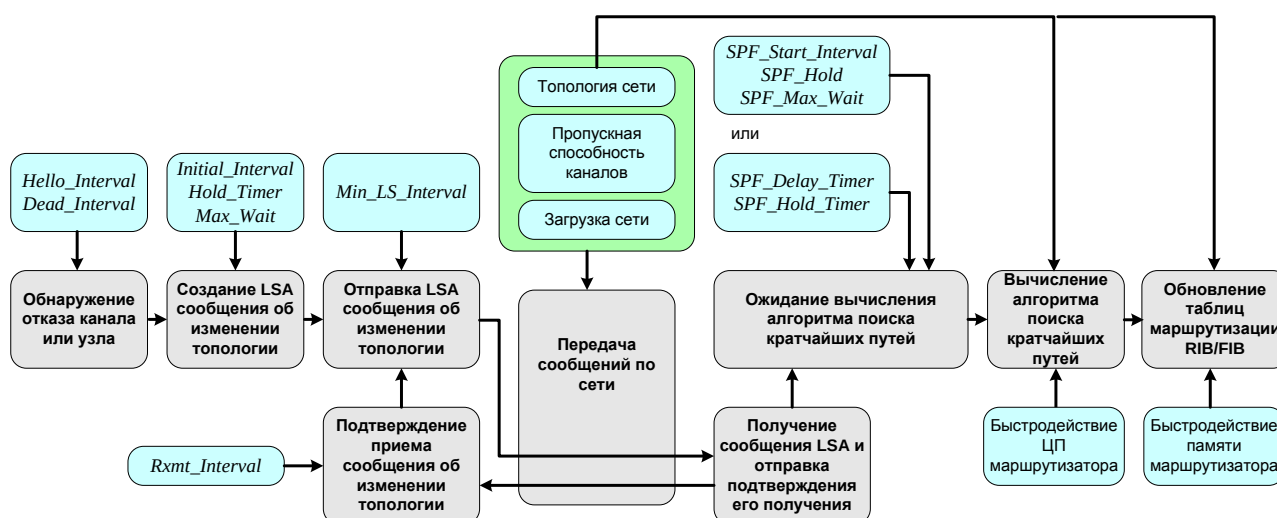


Рис. 5. Процесс сходимости сети OSPF [30, 39]

Временные таймеры, представленные на рис. 5, существенно влияют на устойчивость сети. В RFC 4222 [34] представлены рекомендации для администраторов, эксплуатирующих сети с протоколом OSPF v. 2, которые должны обеспечить высокую устойчивости сети и ее быструю сходимость.

- Необходимо присвоение высокого приоритета пакетам Hello и пакетам подтверждения состояния канала и низкого приоритета - остальным пакетам.
- Необходимо предусмотреть сброс таймеров отказа для канала после получения любых пакетов протокола маршрутизации по этому каналу вместо того, чтобы ожидать поступления очередного пакета Hello. Канал считать отказавшим не только в случае отсутствия пакетов Hello, но и в случае отсутствия любых пакетов протокола маршрутизации за период *Router_Dead_Interval*.
- Для регулировки таймера опправки повторных пакетов LSA, при неподтверждении приема предыдущих (*Rxmt_Interval*), должен использоваться экспоненциальный алгоритм. Это позволит сократить количество повторных передач LSA-сообщений и предотвратить перегрузку низкоскоростных каналов сети.
- Для предотвращения перегрузки сети широкополосным служебным трафиком и повышения эффективности реакции протокола маршрутизации при частых отказах в сети целесообразно использовать алгоритмы экспоненциальной регулировки таймеров.
- Если конфигурация сети предусматривает случаи, когда большая группа маршрутизаторов будет включена/отключена в/из сети, то необходимо использовать задержку начала рассылки LSA-сообщений каждым из этих маршрутизаторов.

Однако выполнение даже этих рекомендаций не может обеспечить высокую устойчивость сетей, в связи с чем профильными комитетами и производителями телекоммуникационного оборудования предлагаются различные способы снижения времени сходимости сетей. Основные технологические подходы к таким способам представлены в следующем подразделе работы.

Основные технологические решения для протоколов маршрутизации направленные на снижение времени сходимости в сети

В работах [1, 30] рассмотрены основные варианты улучшений, применяемые в современных протоколах для повышения времени сходимости сети. При этом, в работе [30], в основном, приводится анализ улучшений, направленных на повышение устойчивости и снижение времени сходимости проводных сетей, а в работе [1] проведен анализ направлений модификации стандартных протоколов, основанных на оценке состояния каналов с целью их применения в мобильных радиосетях MANET.

Рассмотрим основные технологические решения, применяемые в протоколах маршрутизации и направленные на снижение времени их сходимости (рис. 6). При этом, основные направления развития данных

решений, на основе последних исследований, представлены в заключительной части статьи.

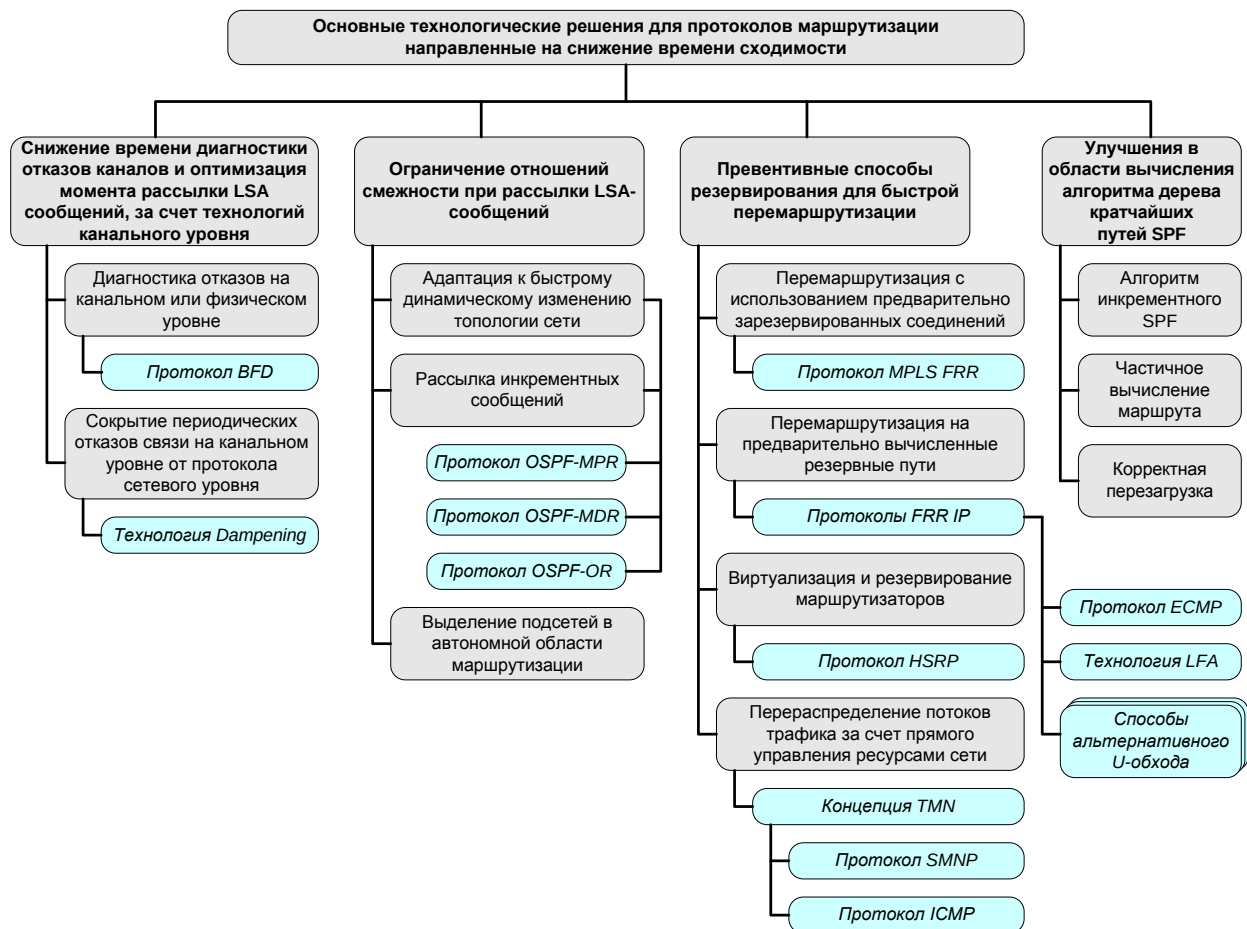


Рис. 6. Основные технологические решения, применяемые в протоколах маршрутизации для снижения времени сходимости

1) Снижение времени диагностики отказов каналов и оптимизация момента рассылки LSA сообщений, за счет технологий канального уровня.

1.1) Диагностика отказов на канальном или физическом уровне. Эффективным способом снижения задержек при диагностике отказов каналов связи является использование информации о состоянии каналов непосредственно от канального протокола или от каналообразующего оборудования. Одним из вариантов реализации такого способа является протокол BFD.

Протокол BFD (Bidirectional Forwarding Detection) [40] основан на миллисекундных таймерах при двунаправленной проверке работоспособности пути, включая интерфейсы и каналы передачи данных между двумя маршрутизаторами [1, 30, 40, 41]. Протокол BFD реализован на канальном уровне модели OSI (Open Systems Interconnection) и предоставляет технологиям этого уровня, таким как Ethernet, сервис обнаружения отказа канала, сопоставимый по времени с технологиями транспортных сетей SONET/SDH (50 мс).

При использовании BDF смежные маршрутизаторы создают сеанс BFD и согласовывают время отправки и получения пакетов BFD с целью обнаружения

отказов в канале связи. Пакеты BFD встраиваются в информационный обмен канального уровня и, в случае потери очередного BDF-пакета, протокол диагностирует отказ канала, о чем он уведомляет маршрутизатор. Такой механизм позволяет маршрутизатору диагностировать отказ канала раньше, чем отказ будет обнаружен при использовании обмена Hello сообщениями.

1.2) Соккрытие периодических отказов связи на канальном уровне от протокола сетевого уровня. Данный способ предусматривает решение задачи диагностики отказов на канальном уровне и, в случае флуктуаций работоспособности канала, соккрытие этих изменений от сетевого уровня, чтобы последний не инициировал пересчет топологии. Одним из таких способов является технология Dampening, реализованная в операционной системе Cisco IOS (начиная с версии 12.0) и в BGP в junOS.

Технология Dampening [42, 43] предусматривает, что при каждом отказе канального интерфейса ему присваивается значение штрафа согласно формуле $P_n = 2^{-t/H} \cdot P_{n-1} + P_{n-1}$. В случае если это накопленное значение штрафа превышает допустимое пороговое значение, то интерфейс отключается. При снижении значения штрафа ниже порогового значения интерфейс включается и начинает снова использоваться.

Данный механизм использует пять параметров [30]:

1. *Штраф (либо другой показатель качества)*. Первоначально – $P(0)=1000$. При отсутствии изменений топологии в каждый *Half_Life_Period* штраф экспоненциально снижается в соответствии с выражением:

$$P(t)=P(0) \cdot 2^{-t/H}. \quad (1)$$

Если счетчик топологических изменений больше единицы за время *Half_Life_Period*, штраф продолжает увеличиваться:

$$2^{-t/H} \cdot P + P. \quad (2)$$

2. *Порог отключения (Suppress_Threshold)* - максимально накопленное значение штрафа, после которого канальный интерфейс отключается. Если счетчик штрафа больше единицы в *период полураспада*, штраф продолжает увеличиваться $2^{-t/H} \cdot P + P$. Значение порога отключения по умолчанию - *Suppress_Threshold=2000*.
3. *Время полужизни (Half_Life_Period)* - продолжительность времени, по истечении которого штраф по экспоненте снижается в соответствии с выражением (1). Это время выбирается на основе измерений флуктуаций канального интерфейса. Если счетчик отказов канального интерфейса больше 1 за время *Half_Life_Period*, штраф увеличивается в соответствии с выражением (2).
4. *Порог повторного использования (Reuses_Threshold)* – накопленное значение штрафа, после которого канальный интерфейс включается снова и начинает использоваться. Значение по умолчанию – 1000.
5. *Максимальное время подавления (Max_Suppress_Time)* – максимальное время, в течение которого канальный интерфейс может быть отключен. В случае если за данное время восстановление связи не произошло, то данный канал считается полностью отказавшим и маршрутизатор

переходит на использование альтернативного пути. Значение по умолчанию $Max_Suppress_Time = 4 \cdot Half_Life_Period$.

Технология Dampening фактически дублирует функционал отложенной рассылки LSA-сообщений, и поэтому в маршрутизаторах эти два режима совместно не используются [30].

2) Ограничение отношений смежности при рассылке LSA-сообщений.

2.1) Установление отношений смежности только через основной и резервный маршрутизаторы сети. После запуска маршрутизатор, работающий на основе протокола по состоянию каналов в ширококвещательной сети, устанавливает наличие отношений смежности с другими маршрутизаторами за счет обмена Hello-сообщениями. Однако в ширококвещательной сети (например, в радиосети со случайным множественным доступом), за счет лавинной рассылки сообщений любой другой маршрутизатор может считаться непосредственно-смежным соседом. Высокий уровень смежности ведет к усложнению топологии сети и приближению ее к полносвязной, что приводит к росту времени вычисления алгоритма SPF при изменениях в ней. Чтобы этого избежать в ширококвещательной сети маршрутизаторы, использующие протокол OSPF, выбирают основной маршрутизатор, называемый выделенным маршрутизатором (DR - Designated Router), и резервный выделенный маршрутизатор (BDR - Backup Designated Router). Маршрутизаторы DR и BDR устанавливают полную смежность со всеми маршрутизаторами в сети, а остальные маршрутизаторы устанавливают отношения смежности только с DR и BDR. В результате количество отношений смежности в сети значительно сокращается. Маршрутизатор DR рассылает ширококвещательные сетевые LSA-сообщения, перечисляющие все маршрутизаторы в сети. На основе этих LSA-сообщений от DR остальные маршрутизаторы корректируют свои таблицы маршрутизации [1].

2.2) Адаптация к быстрому динамическому изменению топологии сети. В мобильных сетях MANET отдельные маршрутизаторы могут динамически присоединяться или оставлять сеть, что заставляет протокол маршрутизации инициировать выдачу с высокой интенсивностью LSA-сообщений об изменении топологии сети. Инженерная группа IETF разработала несколько расширений для протокола OSPF в интересах обеспечения его эффективной работы в сетях MANET [1]:

- OSPF-MPR [44]
- OSPF-OR [45],
- OSPF-MDR [46].

Общим для различных расширений OSPF, используемых в MANET, является то, что они адаптируют протокол состояния связей для характеристик беспроводных сетей и используют альтернативные механизмы для уменьшения издержек и ускорения сходимости сети.

Протокол OSPF-MPR использует технологию многоточечной передачи MPR (Multi-Point Relaying). Каждый маршрутизатор выбирает из смежных ему маршрутизаторов те, через которые достижимы другие маршрутизаторы сети, и

помещает их в группу MPR (рис. 7). Таким образом, каждый маршрутизатор поддерживает отношения связности только с теми узлами, которые входят в его группу MPR, и с теми соседями, которые выбрали его в их собственный MPR. Это позволяет существенно уменьшить общее количество установлений смежности, необходимых в MANET. Чтобы предотвратить исключительный случай, когда сформированная группа MPR не охватывает всей сети, один из маршрутизаторов сети, называемый *синхронизирующим маршрутизатором*, устанавливает отношения смежности со всеми остальными маршрутизаторами [1].

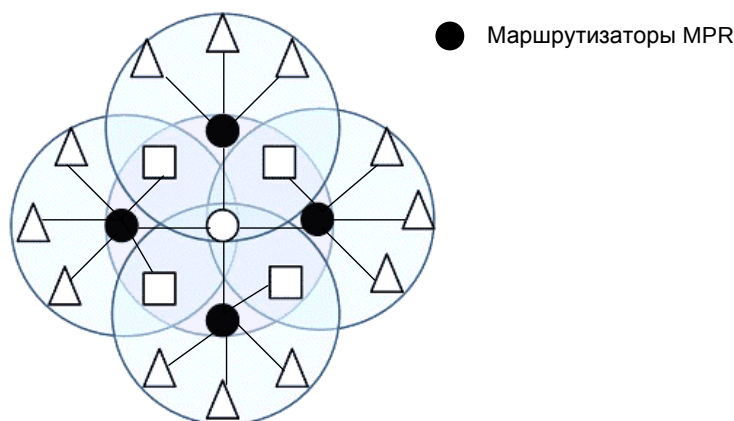


Рис. 7. Многоточечная передача по OSPF-MPR [1]

Протокол OSPF-OR основан на принципе недопустимости установления отношения смежности двумя маршрутизаторами в том случае, если они могут достигнуть друг друга в дереве кратчайшего пути SPT. В OSPF-OR, когда маршрутизатор получает Hello сообщение от нового маршрутизатора, он анализирует дерево кратчайших путей SPT для поиска совместного маршрутизатора-соседа. В случае если новый маршрутизатор достижим через другой маршрутизатор, уже имеющийся в дереве SPT, то отношение смежности с новым маршрутизатором устанавливается через него, без дополнительного обмена LSA-сообщениями. Если ни один из маршрутизаторов не является соседом нового, то это означает, что соседних маршрутизаторов в SPT нет, и требуется установка нового отношения смежности через обмен LSA. Если маршрутизаторы далее приходят к заключению, что принадлежат двум, до настоящего времени несвязанным, частям сети, то эти два маршрутизатора объединяют свои связующие деревья SPT в одно, за счет учета канала связи между этими двумя маршрутизаторами. Остальные маршрутизаторы в сети оповещаются о новом связующем дереве за счет широковещательной рассылки по каналам, входящим в дерево SPT. Данный подход аналогичен действиям протоколов маршрутизации по вектору состояний. При этом полноценный обмен LSA-сообщениями и полный пересчет связующего дерева SPT в OSPF-OR будет инициирован только при отказе канала связи, входящего в отношение смежности в текущем связующем дереве [1].

Протокол OSPF-MDR основан на снижении отношений связности за счет формирования соединенной магистрали выделенных маршрутизаторов DR,

называемых *выделенными маршрутизаторами MANET* (MDR - MANET Designated Router). Каждый маршрутизатор в сети является или MDR, или соседом MDR. Подобно стандартному протоколу OSPF, маршрутизаторы также формируют и резервную магистраль, состоящую из *резервных MDR* (BMDR). При этом, также по аналогии с OSPF, каждый маршрутизатор в сети является или BMDR, или соседом BMDR. Маршрутизаторы, включаемые в сеть, устанавливают отношения смежности только с MDR и BMDR, а через них и с другими маршрутизаторами сети [1].

2.3) Рассылка инкрементных сообщений. Для сокращения объема служебной информации вышеуказанные расширения OSPF для MANET используют следующие механизмы устранения избыточности [1]:

- инкрементные сообщения Hello [45];
- дифференциальные сообщения Hello [46].

Механизм инкрементных сообщений Hello в составе протоколов OSPF-MPR, OSPF-OR и OSPF-MDR позволяет маршрутизаторам сообщать только об изменениях, произошедших в их окружении в течение длительности последнего *Hello_Interval*, вместо полной информации об окружении. Таким образом, если сеть будет устойчива, то большинство сообщений Hello будет иметь значительно меньший объем. Однако при использовании этих механизмов отказы каналов или изменения топологии могут вызвать потерю Hello-синхронизма, так как не позволят узлам сети отслеживать изменения топологии должным образом. Чтобы обнаружить эти случаи вводится нумерация пакетов Hello и контроль правильной последовательности их приема.

Дифференциальные сообщения Hello используют превентивный механизм восстановления синхронизма, в то время как инкрементные сообщения Hello делают их получателя ответственным за управление синхронизацией. Эти механизмы, используемые совместно, позволяют отследить изменение топологии, а также снизить объем служебного трафика в MANET сети.

Аналогичные подходы могут применяться и для рассылки LSA сообщений при изменении топологии сети.

2.4) Выделение подсетей в автономной области маршрутизации. Протоколы внутридоменной маршрутизации могут предусматривать декомпозицию одной большой области маршрутизации на несколько небольших подсетей. Это позволяет уменьшить размер хранимых таблиц маршрутизации и ограничить область рассылки LSA-сообщений отдельной подсетью в случае отказа канала [1, 50].

3) Улучшения в области вычисления алгоритма дерева кратчайших путей SPF. Алгоритм SPF, как правило, использует алгоритм Дейкстры для вычисления путей к узлам сети. Одним из его недостатков является необходимость полного пересчета путей для таблиц маршрутизации при получении сообщения LSA об изменении топологии сети. Вместе с тем, при изменении топологии в дереве путей могут быть части, которые останутся неизменными, и их пересчет не нужен.

3.1) Алгоритм инкрементного SPF. Алгоритм инкрементного SPF (iSPF - Incremental SPF) является более новой версией SPF, которая позволяет избежать ненужных вычислений за счет анализа информации в LSA сообщениях и сопоставления ее с уже построенным в протоколе деревом кратчайших путей SPT. Алгоритм iSPF, получая новый LSA, вычисляет SPF по алгоритму Дейкстры и при этом дополнительно учитывает следующие правила [30].

- Если изменением топологии является добавление нового конечного узла, то дерево путей наращивается до этого узла без полного пересчета;
- Если в результате изменения топологии произошел разрыв путей до конкретных узлов, то iSPF будет инициирован для пересчета путей только от корня до этих узлов, пути к которым были проложены через отказавший канал. Для пересылки данных до узлов, пути которых не изменились, будет использовано дерево, рассчитанное ранее.
- Если в сети появляется новый канал между узлами, к которым уже проложены пути, то пересчет дерева путей не производится.

Алгоритм iSPF является более эффективным для сетевых топологий с меньшей плотностью соединений. При этом, чем более отдаленным от текущего узла является отказ, тем менее трудоемким будет выполнение алгоритма iSPF.

3.2) Частичное вычисление маршрута. Алгоритм частичного вычисления маршрута PRC (Partial Route Computation) используется в протоколе IS-IS и OSPF v.3 и основан на следующем принципе. Каждый раз, когда через маршрутизатор проходит пакет с IP-адресом, содержащим новую сеть, маршрутизатор добавляет эту сеть в таблицу маршрутизации, а дерево путей продляется до этой сети через тот узел, от которого этот пакет был получен. Таким образом не иницируется полный пересчет дерева кратчайших путей, а только наращивается уже рассчитанное древо.

В OSPF v.3 дополнительно к LSA сообщениям с IP адресами используются LSA сообщения, в которых идентификаторы LSA, такие как идентификатор маршрутизатора, идентификатор области маршрутизации и метрика состояния канала, которые являются 32 битными числами. Эти числа однозначно определяют каждый маршрутизатор в области маршрутизации в отличие от OSPF v. 2, который идентифицирует смежные маршрутизаторы по их IP-адресам. Таким образом, в OSPF v.3 информация о доступности IP сетей полностью отделена от информации о доступности маршрутизаторов. В результате, LSA сообщения типов 1 и 2 генерируются и передаются только если изменилась топология и требуется инициализация алгоритма SPF для пересчета путей. При этом LSA сообщения о доступности/недоступности отдельных IP сетей генерируются и передаются при обнаружении/отключении отдельной IP сети и ведут только к изменению информации о префиксах IP, не иницируя пересчет дерева кратчайших путей [1, 51].

3.3) Корректная перезагрузка. Функция корректной перезагрузки поддерживается оборудованием Cisco IOS и JunOS и предусмотрена в RFC 3623 [1, 30, 52]. Данная функция позволяет в случае необходимости проведения

регламентных работ обеспечить корректное временное выведение маршрутизатора из работы в сети без инициализации пересчета топологии. Для реализации корректной перезагрузки используется современное логическое разделение архитектуры области маршрутизации на плоскость управления и плоскость данных.

Маршрутизатор, который планируется к перезагрузке, непосредственно перед ней сохраняет свое состояние в энергонезависимой памяти для последующего восстановления в том же состоянии после перезагрузки и отправляет своим смежным маршрутизаторам специальное локальное LSA сообщение, называемое *grace LSA*. Сообщение *grace LSA* не пересылается получившими его маршрутизаторами далее по сети, оно уведомляет о том, что отправивший его маршрутизатор корректно выйдет из сети на время перезагрузки. Таким образом, изоляция временной неработоспособности конкретного маршрутизатора только в зоне его смежных узлов позволяет не начинать процесс пересчета SPF в сети. При этом маршрутизаторы, получившие сообщение *grace LSA*, продолжают работать так, как будто перегружаемый маршрутизатор доступен, однако временно приостанавливают отправку данных в его адрес.

Большинство реализаций функции корректной перезагрузки предусматривают, что после успешной перезагрузки маршрутизатор повторно иницирует себя в сети путем рассылки стандартных LSA сообщений. С одной стороны, это позволяет избежать топологических несоответствий, если в сети за время перезагрузки изменилась топология. С другой стороны, это практически сводит на нет основные преимущества данного способа, так как после такой лавинной рассылки LSA будут повторно запущены алгоритмы расчета SPF и на других маршрутизаторах.

Производители сетевого оборудования не рекомендуют использовать функцию корректной перезагрузки при наличии в сети отказов каналов и, как правило, эта опция обычно отключается в конфигурациях по умолчанию [1, 30].

4) Превентивные способы резервирования для быстрой перемаршрутизации. Вышерассмотренные способы повышения сходимости сети являются реактивными, то есть новые маршруты определяются только после того, как отказ произошел. Превентивные способы предусматривают, что новые маршруты вычисляются заранее, что позволяет избежать дополнительных временных затрат на оповещение соседних узлов и вычисление алгоритма SPF. Это позволяет превентивным способам обеспечить восстановление связи, сравнимое с восстановлением в транспортных сетях (50 мс).

Подробный анализ превентивных способов восстановления сети после отказа представлен в работах [1, 47]. Как правило, данные способы используют предварительное резервирование сетевых ресурсов и являются частью отдельных технологий управления трафиком, используемых в транспортных сетях.

4.1) Перемаршрутизация с использованием предварительно зарезервированных соединений. Данный способ применяется в транспортных сетях на основе протоколов маршрутизации с установлением соединений (как правило, на основе PNNI и MPLS) и состоит в выделении части общего пула виртуальных соединений в резерв, который в дальнейшем используется при отказе основных соединений.

Примером реализации данного способа, функционирующего в MPLS сетях, является *протокол MPLS FRR* (Multi-Protocol Label Switching Fast Reroute) [48, 49]. Многопротокольная коммутация по меткам MPLS является технологией быстрой передачи пакетов с установлением соединения, и согласно модели OSI, находится между канальным и сетевым уровнями. Технология MPLS не заменяет IP маршрутизацию, но может предоставить дополнительные услуги по управлению трафиком (TE - Traffic Engineering), которые, в том числе, включают в себя и балансировку трафика через различные каналы в сети и быструю перемаршрутизацию на резервные пути. Расширение OSPF-TE, представленное в RFC 4203 [55], ориентированно на обеспечение и поддержание служб MPLS за счет управления маршрутизацией трафика сообщений по путям LSP (Label Switched Paths) в составе сети. Протокол MPLS FRR основан на использовании резервных путей LSP чтобы защитить основные LSP в случае отказов и базируется на протоколе резервирования сетевых ресурсов RSVP-TE [56]. MPLS FRR реализует локальный механизм защиты, когда узел, являющийся смежным к отказавшему элементу сети, переключает трафик с основных LSP на резервные. Резервные LSP позволяют трафику обходить отказавший элемент и восстановиться с основным LSP в узле слияния. Для резервирования LSP применяются схемы резервирования, стандартные для транспортных сетей: 1+1, 1:1, 1:n и m:n [1].

Основной сложностью быстрой перемаршрутизации при предварительном резервировании путей является то, что резервирование ресурсов сети происходит на начальном этапе установления соединений. Таким образом, подобное решение неприемлемо для чистых IP сетей, использующих адаптивно-лавинные протоколы маршрутизации без установления соединений.

4.2) Перемаршрутизация на предварительно вычисленные резервные пути. Особенностью IP сетей является то, что в них предварительные соединения не устанавливаются, и каждый маршрутизатор самостоятельно принимает решение о пути поступающих к нему пакетов. Поэтому в этих сетях каждый маршрутизатор предварительно вычисляет пути (как правило, на этапе вычисления SPT), по которым будет передаваться трафик в случае отказов.

Множество способов быстрой перемаршрутизации в IP сетях объединяются понятием FRR IP (FRR - Fast Reroute). Способы FRR IP подобны протоколу MPLS FRR в том смысле, что они оба используют заранее вычисленные резервные маршруты, которые позволяют обойти отказ элемента сети без необходимости сразу же сообщать другим маршрутизаторам об отказе. Однако отличие способов FRR IP от MPLS FRR состоит в том, что каждый маршрутизатор предварительно вычисляет резервные пути, которые будут им использоваться при локальном отказе в сети. Если у маршрутизатора имеются

несколько путей равной метрики до узла назначения и некоторые из них не проходят через отказавшие элементы сети, то такие пути используются в качестве путей восстановления в соответствии с протоколом ESMР. В отсутствие таких путей маршрутизатор ищет другие резервные пути, которые будут иметь худший показатель метрики, но они не проходят через отказавший элемент сети.

Рассмотрим несколько базовых решений, применяемых для обеспечения быстрого восстановления связи.

Протокол ESMР (Equal Cost Multi-Path) позволяет в составе одного маршрута использовать несколько путей равной стоимости. Если на этапе вычисления кратчайших путей было обнаружено несколько путей с равной метрикой между одной парой абонентов, то ESMР позволяет их использовать, поочередно выбирая каждый из них с равной вероятностью (алгоритм Round-robin). Каждые 10 минут таблица маршрутизации обновляется. Маршруты в ESMР проходят как между двумя смежными маршрутизаторами, так и через несколько маршрутизаторов в сети. В общем случае протокол ESMР применяется для балансировки нагрузки на сеть, однако он обеспечивает и надежность маршрутизации при отказах. Так, при отказе одного из путей происходит переключение на стандартную однопутевую схему, при этом рассылка LSA сообщений и пересчет топологии ведется уже после такого переключения. Схема совместного использования OSPF и ESMР реализована в протоколе OSPF-ESMР [1].

Технология LFA (Loop Free Alternate) предложена для IP сетей в RFC 5286 [57] и основана на поиске циклов, проходящих через маршрутизатор-источник и другие маршрутизаторы в сети. При отказе канала связи протокол маршрутизации в качестве резервного пути использует части предварительно рассчитанного цикла, в который входит маршрутизатор-источник и маршрутизатор, недоступный в результате отказа [1].

Способы альтернативного U-обхода. Если пути ESMР/LFA не доступны, маршрутизатор может сформировать обходной путь за счет отправки трафика в направлении источника, но через другой маршрутизатор у которого в таблице маршрутизации может храниться альтернативный путь к узлу назначения. Пути восстановления через такие маршрутизаторы называют путями восстановления мультитранзитного участка, и стандартный способ такого восстановления представлен в RFC 5714 [58].

В настоящее время предложено несколько вариантов реализации способов альтернативного U-обхода [1]:

- прямое указание в заголовке IP пакета на запрет пересылки пакета маршрутизатору, у которого отказал канал [59];
- отправка пакета другому маршрутизатору, который имеет альтернативные отношения связности с областью, в которой находится узел-получатель [60];
- использование маршрутизаторами нескольких топологических конфигураций SPT (мультитопологий) с возможностью перехода

между ними в случае отказа канала, используемого в текущем SPT [61];

- тунелирование трафика в направлении U-обхода отказавшего элемента к месту, где может быть продолжена его нормальная передача, при этом в качестве механизмов тунелирования могут быть использованы IP в IP по RFC 1853 [62] или GRE по RFC 1701 [63].

Примеры использования различных вышепересмотренных способов перемаршрутизации на предварительно вычисленные резервные пути приведены на рис. 8.

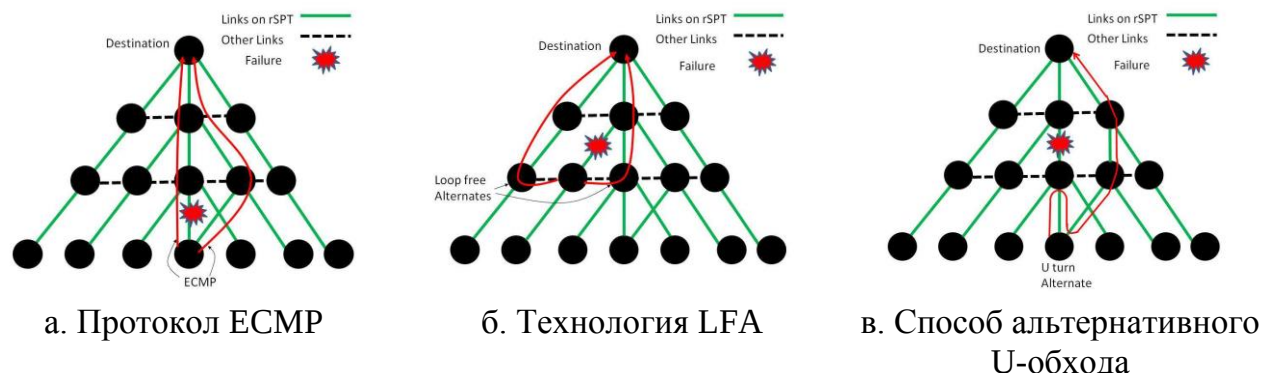


Рис. 8. Примеры использования различных способов перемаршрутизации на предварительно вычисленные резервные пути [1]

4.3) Виртуализация и резервирование маршрутизаторов.

Современные технологические решения позволяют объединить группу маршрутизаторов в единый виртуальный маршрутизатор. При этом внутри этой группы предусмотреть механизмы резервирования, балансировки нагрузки, расширения производительности, отказоустойчивости и т.д. Примером реализации такой виртуализации является протокол HSRP (Hot Standby Router Protocol), описываемый в RFC 2281 [53].

4.4) Перераспределение потоков трафика за счет прямого управления ресурсами сети. Policy Routing - политика маршрутизации, которая позволяет создавать отдельные правила и таблицы маршрутизации для различных типов трафика. Внутри этих правил может быть предусмотрены как дополнительные настройки балансировки нагрузки, так и различные сценарии маршрутизации при отказах в сети. Кроме того, для управления маршрутизацией может быть использована реконфигурация протоколов маршрутизации на основе протоколов управления сетевыми ресурсами TMN, SMNP и ICMP [54].

Помимо вышеперечисленных сетевых способов повышения устойчивости сети и снижения ее времени сходимости дополнительно могут быть использованы технологии и протоколы, находящиеся выше сетевого уровня модели OSI. Анализ использования таких технологий для восстановления сети после отказа ее элементов приведен в работе [64].

Анализ результатов исследований по оценке времени сходимости сети

При разработке новых способов снижения времени сходимости, как правило, требуется проведение оценки данного времени для стандартных реализаций протоколов маршрутизации и его сравнительный анализ с предлагаемыми модификациями. В этой связи, ниже приводится краткий обзор работ по исследованию времени сходимости в сетях. При этом отметим, что подавляющее число такого рода исследований выполнено на основе моделирования протоколов маршрутизации в программной среде OPNET.

В работе [65] представлены исследования времени сходимости сети для протоколов RIP, OSPF на основе моделирования в среде OPNET. Топология исследуемой сети представлена на рис. 9. В сети было образовано две виртуальных подсети DS1 и DS3. Исследовалось время сходимости сети в зависимости от временных параметров отказов канала связи между R1 и R2. Авторы использовали настройки протоколов OSPF и RIP по умолчанию. Результаты исследования приведены на рис. 10.

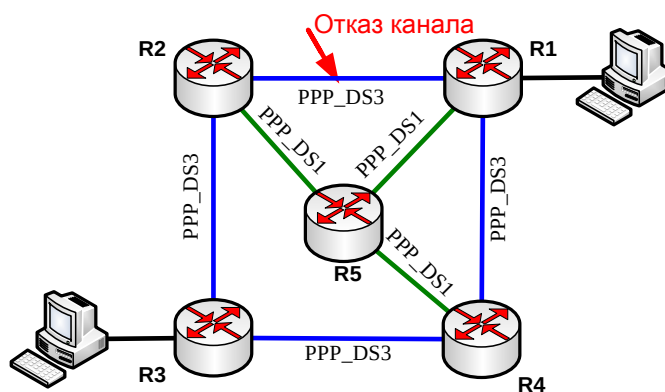


Рис. 9. Топология исследуемой сети на основе моделирования сети на основе маршрутизаторов Cisco 7200 в работе [65]

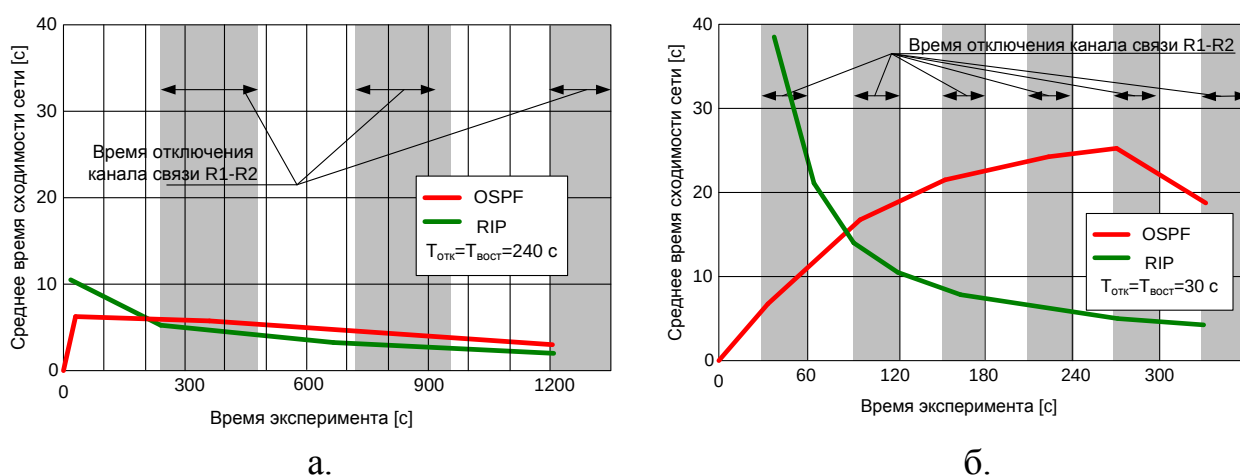


Рис. 10. Результаты моделирования времени сходимости сети в OPNET, представленные в работе [65]

Как отмечается авторами работы [65], более высокая частота отказов канала R1-R2 ведет к повышению времени сходимости сети. К дискуссионным вопросам, отмечаемым авторами работы, относится более высокая

эффективность протокола RIP над протоколом OSPF, по критерию минимизации времени сходимости сети, что расходится с общепринятым мнением об эффективности данных протоколов. Для объяснения более быстрой сходимости протокола RIP авторы указывают на значение времени ожидания восстановления связи (dead time). У OSPF данный интервал равен 40 с, что в три раза меньше чем у RIP (180 с). Таким образом, OSPF иницирует реконфигурацию сети в три раза чаще по сравнению с RIP за один и тот же функциональный интервал и, следовательно, среднее время сходимости OSPF - больше.

Особый интерес представляют работы, в которых проводились как моделирование, так и экспериментальные исследования сходимости сети на реальном оборудовании, а также сравнение этих результатов.

В работе [30] в среде OPNET проведено исследование сети, использующей протокол OSPF состоящей из 24 узлов и 49 каналов, с топологией, представленной на рис. 11.

Сетевые компоненты на рис. 11: универсальные маршрутизаторы slip8_gtwy_690_upgrade, соединения – PPP SONET OC48 со скоростью передачи данных 2488,32 Мбит/с. В работе исследовалось время сходимости сети при различных значениях таймера Hello, таймера повторной передачи и таймеров задержки расчета алгоритма поиска кратчайших SPF, в частности:

- 1) влияние сокращение интервала Hello с 10 с до 1 с на скорость сходимости и загрузку центрального процессора (ЦП) маршрутизатора при однократном и многократном периодическом отказе узла сети;
- 2) влияние временных параметров задержки вычисления алгоритма SPF (*SPF_Delay_Timer* и *SPF_Hold_Timer*) на устойчивость сети и время сходимости.

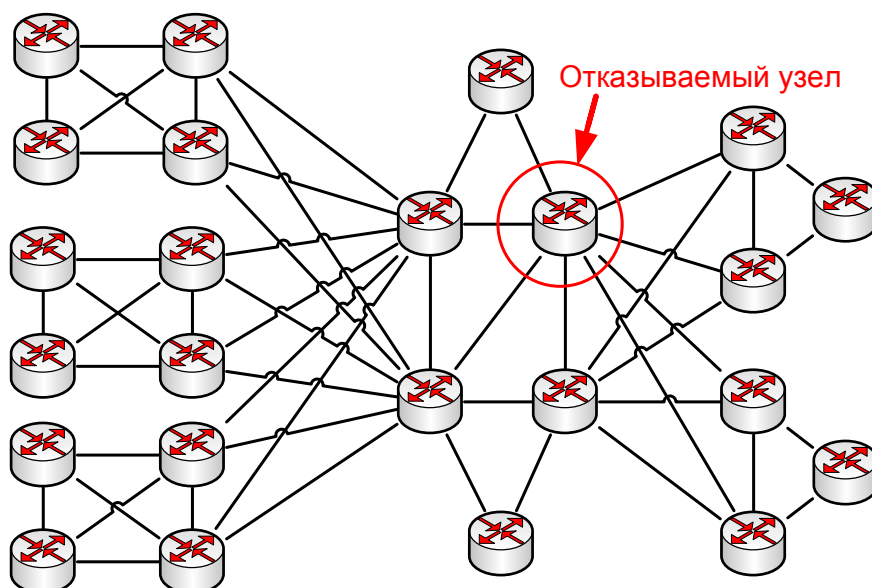


Рис. 11. Топология сети, исследуемая в работе [30]

Влияние сокращения интервала Hello с 10 с до 1 с на скорость сходимости и загрузку ЦП маршрутизатора при однократных отказах узла в сети представлено на рис. 12, 13.

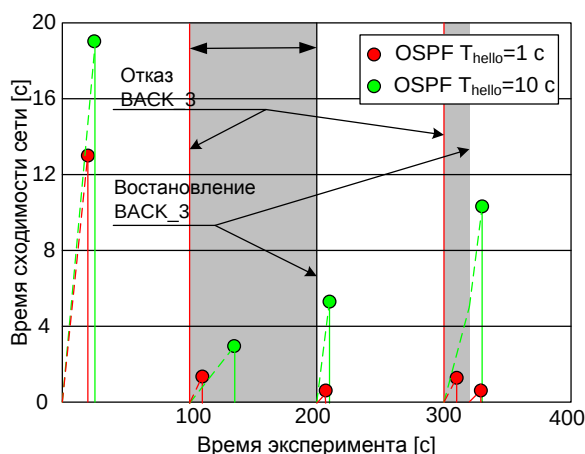


Рис. 12. Временная диаграмма скорости сходимости сети при отказе/восстановлении узла [30]

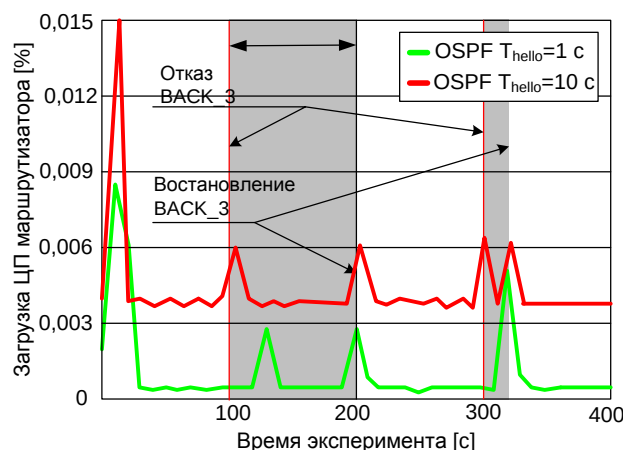


Рис. 13. Временная диаграмма загрузки ЦП маршрутизатора при отказе/восстановлении узла [30]

Графические зависимости на рис. 12 показывают, что сокращение интервала рассылки Hello сообщений существенно снижает время сходимости сети из-за более быстрого обнаружения отказа и восстановления. Кроме того, снижение интервала Hello ведет к тому, что в ряде случаев алгоритм SPF инициализируется чаще. В частности, при $Hello_Interval=1$ с обновление таблицы маршрутизации в сети происходит дважды после отказа на 300 секунде функционирования сети (рис. 12). Это происходит из-за того, что уменьшение $Hello_Interval$ приводит к пропорциональному уменьшению таймера ожидания восстановления связи $Dead_Interval$, в результате быстрее генерируются LSA сообщения, которые провоцируют пересчет SPF. Двойное вычисление SPF соответствует двойному пику нагрузки ЦП на рис. 13 в интервале 300-350 с времени моделирования.

Таким образом, снижение интервала Hello, несомненно, позволяет более быстро обнаружить отказ, но, в то же время, снижение данного параметра может стать причиной дополнительных циклов вычисления алгоритма SPF, что не лучшим образом скажется на общей стабильности сети и времени ее сходимости, в целом.

В работе [30] также было проведено моделирование влияния периодических (с интервалом 20 с) отказов/восстановлений узла сети на скорость сходимости и загрузку ЦП маршрутизатора при интервалах рассылки Hello 10 с и 1 с (рис. 11). Результаты моделирования представлены на рис. 14, 15.

Анализ графических зависимостей на рис. 14 позволяет подтвердить ранее сделанный вывод о том, что снижение интервала Hello позволяет более быстро обнаружить отказ, одновременно приводя к дополнительным циклам пересчета алгоритма SPF. При этом загрузка ЦП маршрутизатора возрастает вдвое, но остается в незначительных пределах (рис. 15).

Увеличение интервала Hello с 1 до 10 с эквивалентно «загрублению» реакции протокола маршрутизации на отказы в сети. При $Hello_Interval=10$ с ($T_{hello}=0,5T_{отк}$) сеть реагирует на каждое четвертое событие требующие пересчета топологии, в то время как при $Hello_Interval=1$ с ($T_{hello}=0,1T_{отк}$), каждый факт отказа или восстановления узла инициирует пересчет алгоритма SPF.

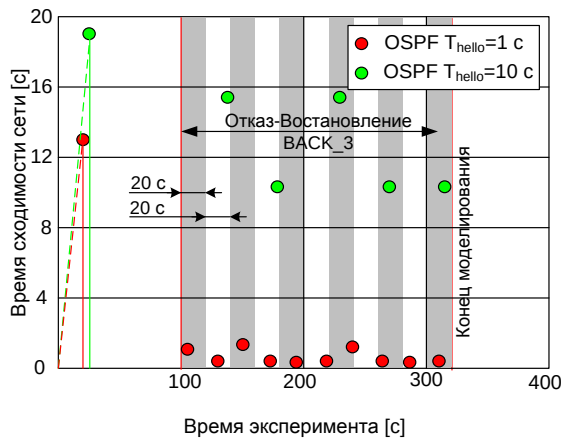


Рис. 14. Время сходимости сети при периодическом (20 с) отказе/восстановлении узла в сети [30]

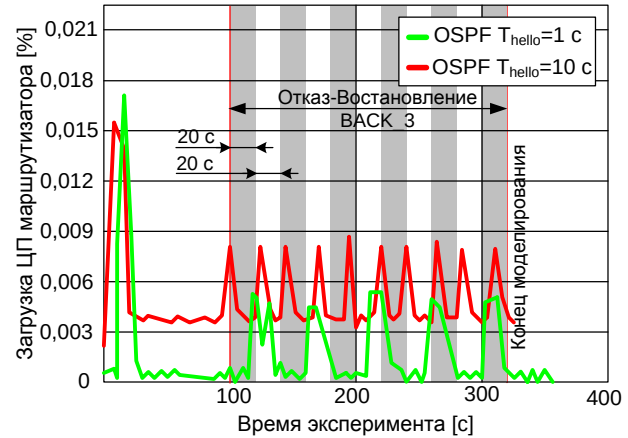
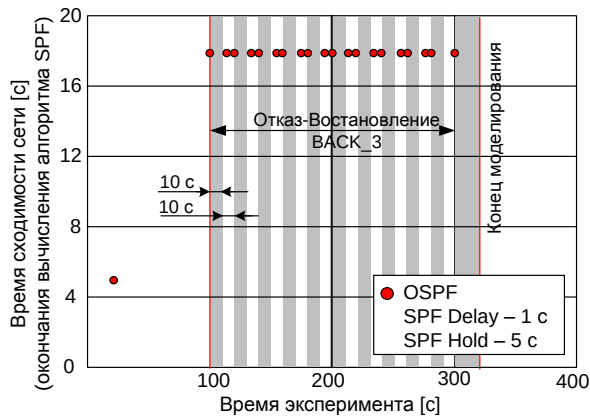


Рис. 15. Загрузка ЦП маршрутизатора при периодическом (20 с) отказе/восстановлении узла в сети [30]

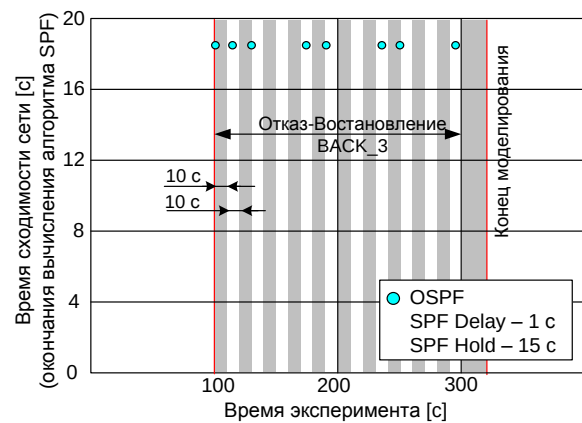
Для дополнительного исследования влияния временных параметров запуска вычисления SPF в работе [30] было проведено моделирование периодических отказов/восстановлений узла сети (рис. 11) с интервалом 10 с при различных значениях интервала между двумя выполняемыми подряд вычислениями алгоритма SPF (SPF_Hold_Timer). Задержка выполнения алгоритма расчета кратчайших путей после получения очередного сообщения об изменении топологии в обоих эксперимента принималась равной $SPF_Delay_Timer = 1$ с. Время между двумя следующими подряд вычислениями алгоритма расчета кратчайших путей в различных экспериментах было равно: $SPF_Hold_Timer_1=5$ с и $SPF_Hold_Timer_2=15$ с. Результаты моделирования представлены на рис. 16.

Анализ результатов моделирования (рис. 16) показывает, что увеличение времени между двумя вычислениями алгоритма SPF (SPF_Hold_Timer) с 5 до 15 с приводит к уменьшению количества вычислений SPF примерно в 2 раза, при одном и том же значении времени сходимости сети. Это происходит из-за того, что за более длительный интервал SPF_Hold_Timer маршрутизаторы в сети успевают получить большее количество LSA сообщений об отказе узла и производят расчет SPF, ориентируясь на последнее из полученных сообщений.

Таким образом, с одной стороны увеличение времени между вычислениями алгоритма SPF позволяет снизить количество дополнительных пересчетов алгоритма SPF, а с другой - возрастает вероятность топологических несоответствий между реальным состоянием сети и топологией сети, указанной в таблице маршрутизации, которой руководствуется маршрутизатор при передаче трафика в сети.



а.

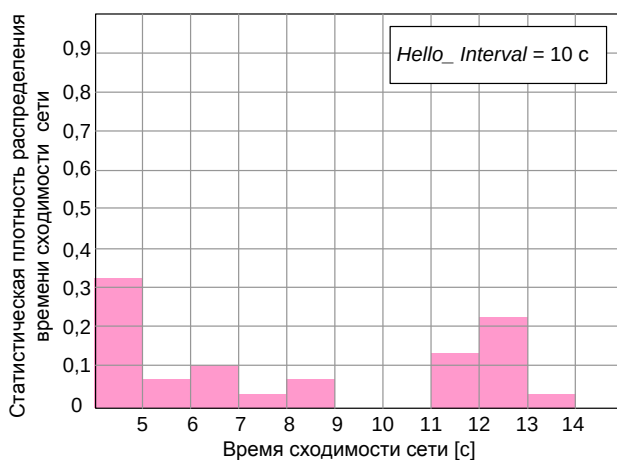


б.

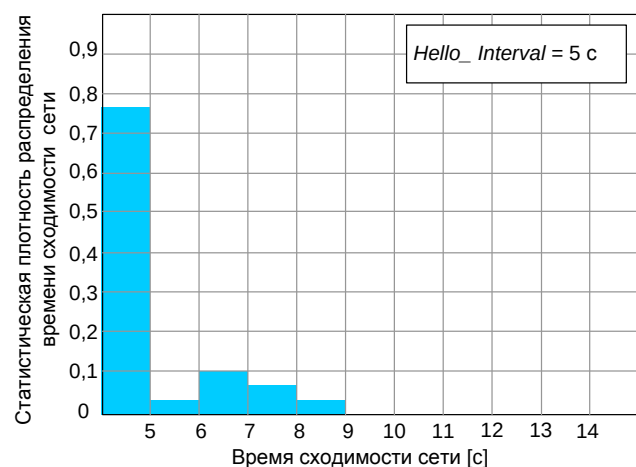
Рис. 16. Исследование влияния временных параметров запуска алгоритма SPF на количество и время сходимости сети [30]

Вышеизложенные эффекты от воздействия периодических отказов элементов сети подтверждаются другими исследованиями. В частности, в работе [66] приводятся результаты исследований реакции протокола OSPF на периодические многократные отказы каналов в области маршрутизации.

В работе [66] показано, что в условиях постоянных периодических отказов в сети, в конечном итоге статистическое распределение времени сходимости приходит к некоторому стационарному распределению (рис. 17).



а.



б.

Рис. 17. Статистическое распределение времени сходимости сети OSPF в условиях периодических многократных отказов каналов [66]

Анализ графических зависимостей на рис. 17 показал, что, когда интервал Hello равен 10 с (значение по умолчанию), менее чем в 30% случаях время сходимости сети меньше 6 с, что соответствует единственной итерации пересчета путей за счет выполнения алгоритма SPF. В случаях, когда время сходимости находится в интервале 6-7 с, некоторое число маршрутизаторов выполняет 2 итерации вычисления алгоритма SPF (при $SPF_Delay_Timer=1$ с и $SPF_Hold_Timer=1$ с) из-за непрерывно приходящих LSA сообщений об изменениях топологии. Когда время сходимости составляет 8-9 с, это

соответствует ситуации, когда алгоритм SPF вычисляется трижды, при этом значение *SPF_Hold_Timer* (в соответствии с алгоритмом его экспоненциального роста) увеличивается до 2 с. Для случаев, когда время сходимости превышает 11 с, есть два объяснения. Первое – это происходит из-за тройного вычисления алгоритма SPF, в условиях, когда *SPF_Hold_Timer* увеличивается до 3 с. Второй вариант – вычисление алгоритма SPF происходит дважды, при этом второе вычисление задерживается в соответствии с *SPF_Hold_Timer*=5 с, что приводит к итоговому времени сходимости 11 с. В общем результаты, представленные в работе [66], показывают, что при интервале Hello равном 10 с, для обеспечения сходимости сети в 50% случаев необходимо более 10 с.

Анализируя причины динамики роста времени сходимости в условиях периодических отказов, авторы работы [66] приходят к выводу, что основной причиной такой динамики является многократность отказов и их асинхронность относительно временных параметров протокола. Авторы отмечают, что сценарии периодических «каскадов» отказов каналов могут служить причиной блокировки сети в результате перехода ее в режим перманентного пересчета изменений топологии.

Особый интерес представляют исследования с одинаковыми исходными данными, проведенные как в среде моделирования OPNET, так и на реальном телекоммуникационном оборудовании. Их анализ позволяет оценить адекватность моделирования в OPNET и погрешность результатов моделирования в этой среде.

В работе [67] представлены исследования времени сходимости сети на основе моделирования как в среде OPNET, так и экспериментальных исследований для протоколов RIP, OSPF и EIGRP. Также в данном исследовании представлены выводы о влиянии отказов сети на эффективность маршрутизации трафика, критичного к задержкам (видео и речи). Временные параметры протоколов были настроены по умолчанию. Топология исследуемой сети представлена на рис. 18.

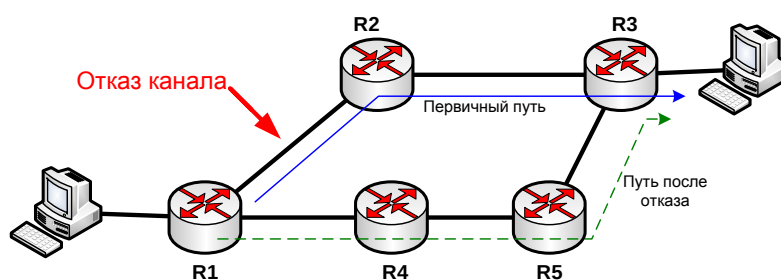


Рис. 18. Топология исследуемой сети в работе [67]

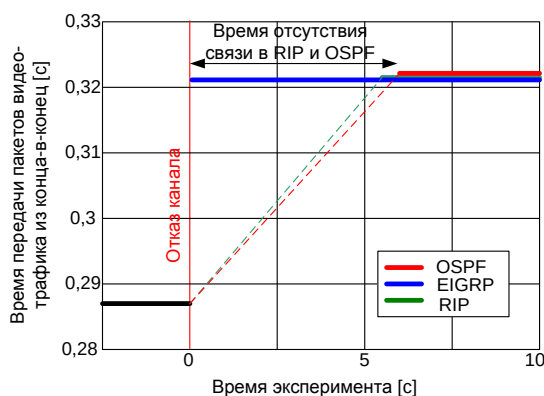
Результаты исследования времени сходимости протоколов для топологии на рис. 18 при моделировании в среде OPNET и при экспериментальных исследованиях с использованием реального оборудования (маршрутизаторы – Cisco 2811, каналы связи – Ethernet 100Base-T) представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты исследования
времени сходимости протоколов в среде OPNET [67]

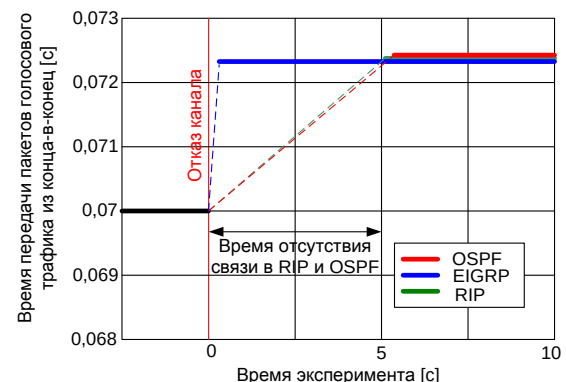
Протокол маршрутизации	Время сходимости при первичной инициализации соединений в сети		Время сходимости при реконфигурации после отказа		
	Моделирование в OPNET	Эксперимент	Моделирование в OPNET	Эксперимент	Погрешность моделирования
RIP	11,01 с	-	8,66 с	13,66 с	62%
OSPF	10,75 с	-	5,01 с	6	20%
EIGRP	5,018 с	-	0,025 с	2,12	4300%

В работе [67] делается вывод о том, что различие в результатах, полученных на основе моделирования и в реальном эксперименте, достигает нескольких секунд. Так, моделирование протокола EIGRP в среде OPNET показывает, что протокол сходится в течение миллисекунд, но в эксперименте на реальном оборудовании на это требуется порядка 2 с. Такое расхождение, на взгляд авторов, обусловлено тем, что средство моделирования не учитывает время, которое требуется для идентификации отказа канала связи.

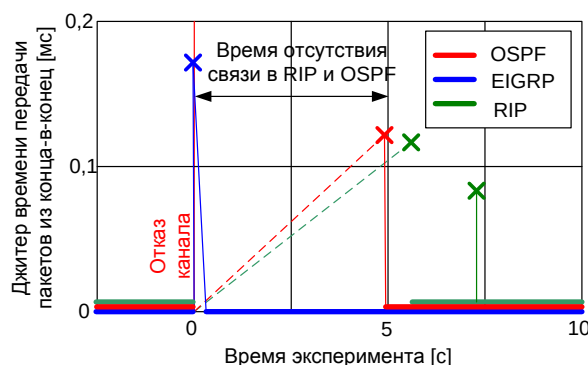
Дополнительно в работе [67] было исследовано влияние отказов сети на эффективность маршрутизации трафика, критичного к задержкам (видео и речи). Результаты данного моделирования представлены на рис. 18.



а.



б.



в.

Рис. 18. Результаты исследования влияния отказов сети на эффективность маршрутизации трафика, критичного к задержкам (видео и речи) [67]

Проведенное моделирование в среде OPNET показало, что при использовании протоколов RIP и OSPF реконфигурация путей передачи потоков трафика в сети ведет к перерывам связи порядка 5 с. При этом после восстановления связи, передаваемым потокам характерно высокое значение джитера – 0,1...0,12 мс. Протокол EIGRP более устойчив к изменению топологии, и время перерыва связи для него составляет не более 0,05...0,1 с (рис. 18в) [67].

В работе [37] представлены результаты сравнительного анализа сходимости сети, использующей протоколы IS-IS и OSPF, на основе результатов моделирования в среде OPNET и экспериментов на маршрутизаторах Cisco 2500. В этой же работе был проведен анализ времени сходимости при условии использования обнаружителя отказа канала средствами протокола канального уровня (вариант протокола BFD). Исследовались варианты протоколов с таймерами по умолчанию. Моделируемая топология представлена на рис. 19. В таблице 6 представлены результаты моделирования сходимости сети для каналов с различной пропускной способностью применительно к протоколам OSPF и IS-IS.

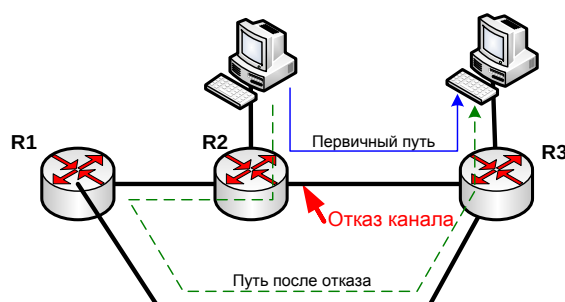


Рис. 19. Топология сети, исследуемая в работе [37]

Таблица 6 – Время сходимости сети для каналов с различной пропускной способностью при использовании протоколов OSPF и IS-IS [37]

Пропускная способность каналов сети	Моделирование в OPNET [с]		Экспериментальные исследования [с]			
			без использования BDF		с использованием BDF	
	OSPF	IS-IS	OSPF	IS-IS	OSPF	IS-IS
64 кбит/с	13,279	1,0055	13,156	1,428	0,547	0,086
128 кбит/с	13,652	1,0027	12, 129	1,264	0,538	0,076
256 кбит/с	13,921	1,0025	13,101	1,126	0,537	0,065
512 кбит/с	13,344	1,0013	13,057	1,254	0,541	0,056
2,048 Мбит/с	12,995	1,0003	13,055	1,066	0,536	0,048

Основной вывод, который можно сделать по итогам анализа таблицы 6 – это инвариантность времени сходимости сети к пропускной способности каналов связи при их низкой загрузке, а также существенное снижение времени сходимости сети (на 93-95%) при использовании обнаружителя отказов канального уровня на основе протокола BDF.

Анализ погрешности моделирования в среде OPNET показал, что относительная погрешность при сравнении с экспериментальными данными составляет 2-11% для протокола OSPF и 22-40% для протокола IS-IS. Общим

выводом по результатам оценки погрешности может быть то, что относительная погрешность моделирования убывает с ростом значений пропускной способности каналов сети и увеличением значений временных параметров протокола. Это происходит из-за того, что длительность времени от момента отказа до момента его обнаружения, которая не учитывается средствами моделирования в OPNET, при увеличении указанных значений начинает играть все меньшую роль.

Кроме того, в работе [37] содержатся результаты исследования в среде OPNET модели смешанной сети из 93 маршрутизаторов с каналами различной пропускной способностью - от 9,6 кбит/с до 10 Мбит/с. При этом каналы 9,6 кбит/с, 14,4 кбит/с и 64 кбит/с составляли 90% топологии сети, а остальные 10% - каналы 2 Мбит/с и 10 Мбит/с. Максимальное время сходимости такой сети в случае отказа канала при использовании протокола OSPF составляет приблизительно 12 с, а для протокола IS-IS - приблизительно 70 с. В данной работе показано, что в моменты отказов в медленных каналах возникают перегрузки LSA сообщениями, приводящие к их потере, что, в свою очередь, приводит к лавинообразному нарастанию загрузки из-за новых попыток их передачи. Так в протоколе OSPF использование каналов 9,6 кбит/с и 14,4 кбит/с достигает 80-100%, каналов 64 кбит/с - 10-20%, а каналов 2 и 10 Мбит/с - менее 10%. При этом протокол IS-IS сходится за большее время из-за большей загрузки медленных каналов собственными сообщениями.

В работе [68] было проведено исследование эффективности протоколов OSPF и EIGRP в среде OPNET в условиях различной нагрузки на сеть, состоящей из 6 маршрутизаторов, соединенных общим каналом PPP_DS1 1,544 Мбит/с, а также исследование времени сходимости этих протоколов. К сожалению, автор работы не приводит полные данные об условиях эксперимента, однако в связи с тем, что данные в этой работе совпадают с ранее приведенными исследованиями, они приводятся в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – Оценка параметров эффективности сети, использующей протоколы EIGRP и OSPF [68]

Загрузка сети	Средняя задержка пакетов в сети [с]		Средняя задержка пакетов видеотрафика в сети в условиях QoS [с]		Потери пакетов	
	OSPF	EIGRP	OSPF	EIGRP	OSPF	EIGRP
0	$\approx 10^{-6}$		$\approx 2 \cdot 10^{-2}$		0 %	
20 %	$\approx 7 \cdot 10^{-4}$	$\approx 2 \cdot 10^{-5}$	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$	$\approx 3 \cdot 10^{-2}$	0,35%	0,14%
40 %	≈ 20	≈ 2	≈ 3	$\approx 1,5$	6%	2,9%
60 %	≈ 27	≈ 10	≈ 3	≈ 5	нет данных	
80 %	≈ 30	≈ 20	≈ 7	≈ 7		

Таблица 8 – Оценка времени сходимости в сети, использующей протоколы EIGRP и OSPF при однократном изменении топологии [68]

Загрузка сети	Время сходимости сети	
	OSPF	EIGRP
40 %	≈ 5 с	$\approx 0,3$ с
80 %	≈ 15 с	$\approx 7,5$ с

В работе [69] рассматривалось экспериментальное исследование сходимости сети на основе технологии Frame Relay, имитирующей работу двух автономных областей маршрутизации с использованием протоколов OSPF и RIP. Для оценки времени сходимости авторами была построена экспериментальная сеть, представленная на рис. 20. Настройки протоколов в сети - по умолчанию. Диагностика времени сходимости сети ведется по маршруту R4-R7 (см. рис. 20).

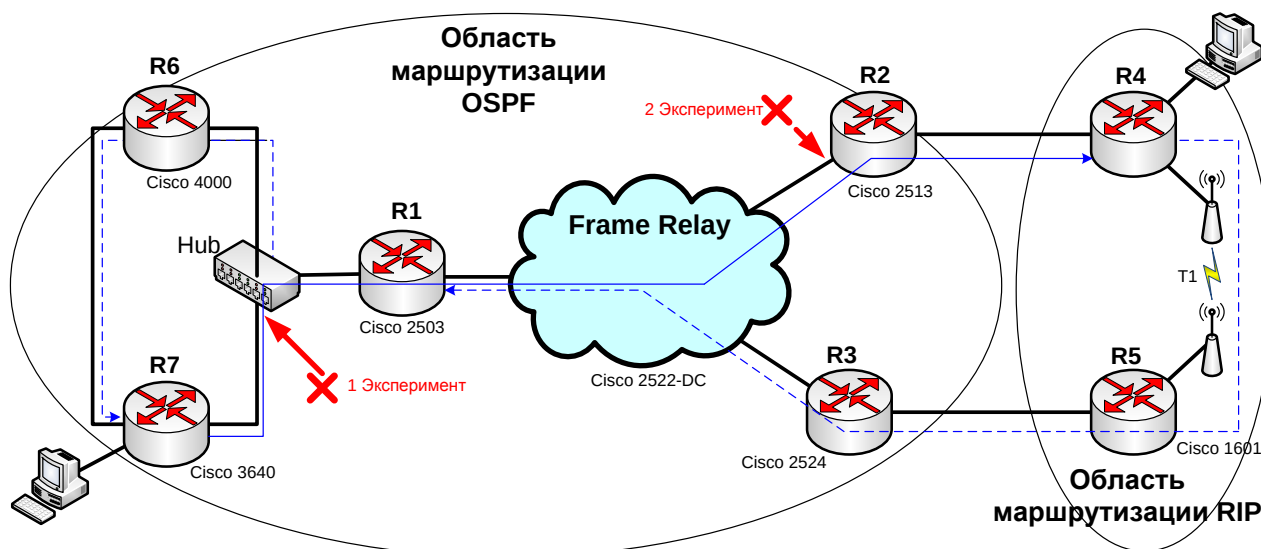


Рис. 20. Экспериментальная сеть, исследуемая в работе [69]

В первом эксперименте исключается связь R1-R7 за счет отключения соответствующего порта Ethernet коммутатора. В этом случае соединение R4-R7 реконфигурируется через R6. Время сходимости сети с протоколом OSPF при этом составляет 14 ± 2 с, потери трафика на контролируемом маршруте - 7%.

Во втором эксперименте исключается связь R2-R1, за счет отключения соответствующего порта на маршрутизаторе R1. В этом случае соединение R4-R7 реконфигурируется через маршрутизаторы R3 и R5. В этом эксперименте авторами исследовались вопросы сходимости как сети в целом, так и отдельно сетей на основе протоколов OSPF и RIP, причем данные протоколы имеют различные временные параметры.

Результаты проведенных в работе [69] исследований сведены в таблицу 9.

Анализ результатов, проведенных в работе [69] экспериментов показывает слабое влияние изменения значений секундных таймеров на параметры сходимости внутри отдельных сетей. Возможно, это объясняется тем, что авторы не стали исследовать существенно более низкие значения таймеров в миллисекундном диапазоне, так как именно этот диапазон таймеров, как показывают исследования [1, 30, 73], позволяет обеспечить высокое время сходимости сети. При этом важным выводом является то, что время сходимости объединенной сети, построенной на протоколах с различными временными параметрами, составляет значения в 1,5-7 раз дольше, чем сходимость самых медленных сетей в ее составе, а потери трафика составляют от 20 до 40%. Данный вывод подтверждается похожими

результатами исследований [83, 84], которые показывают, что время сходимости объединенных сетей из нескольких автономных областей маршрутизации составляет не менее 50-200 с.

Таблица 9 – Результаты экспериментальных исследований объединенной сети на основе протоколов OSPF и RIP [69]

	Исследуемый объект	Параметры протокола				Время сходимости	Потери трафика
		Update Timer (Hello Interval)	Invalid Timer (Dead Interval)	Hold_Down Timer (Max Hold Timer)	Flush Timer (Таймер сброса в нач. значения)		
Таймеры по умолчанию	Сеть OSPF	10 с	40 с	5 с	5 с (?)	14±2 с	7%
	Сеть RIP	30 с	180 с	180 с	240 с	105±5 с	53%
	Сеть в целом					472 с	23%
Быстрые таймеры	Сеть OSPF	5 с	10 с	10 с	30 с	11,8 с	5,9%
	Сеть RIP	5 с	10 с	10 с	30 с	119,8 с	59,9%
	Сеть в целом					138 с	69,1%
Медленные таймеры	Сеть OSPF	60 с	360 с	360 с	480 с	11,6 с	5,8 %
	Сеть RIP	60 с	360 с	360 с	480 с	120 с	63%
	Сеть в целом					867,8 с	43,3%

В работе [70] были проведены экспериментальные исследования времени сходимости протокола OSPF-TE в оптической транспортной сети GMPLS в случае, когда пути коммутации меток LSP (Label Switch Path) в сети уже установлены, и они вынужденно перенаправляются в результате отказа единственного канала связи. Топология экспериментальной сети представлена на рис. 21.

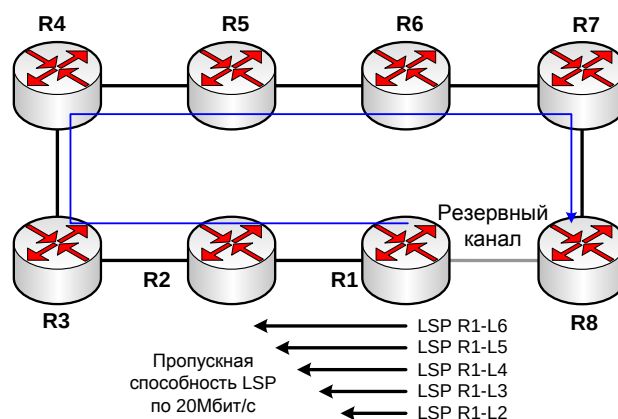


Рис. 21. Модель оптической транспортной сети на основе протокола OSPF-TE, исследуемая в работе [70]

Распределение статистических оценок времени сходимости при первоначальном установлении путей LSP при многократном моделировании сети GMPLS (на рис. 21) представлено на рис. 22.

Периодичность генерации LSA сообщений о доступности узлов в протоколе OSPF-TE достигает значения до 3 с и является основным фактором, определяющим время сходимости сети. Увеличение периода рассылки

сообщений LSA приводит к более длительному времени сходимости. Как показано на рис. 22(е), время сходимости приблизительно 5 с необходимо для LSP с 5 транзитными участками (от R1 до R6).

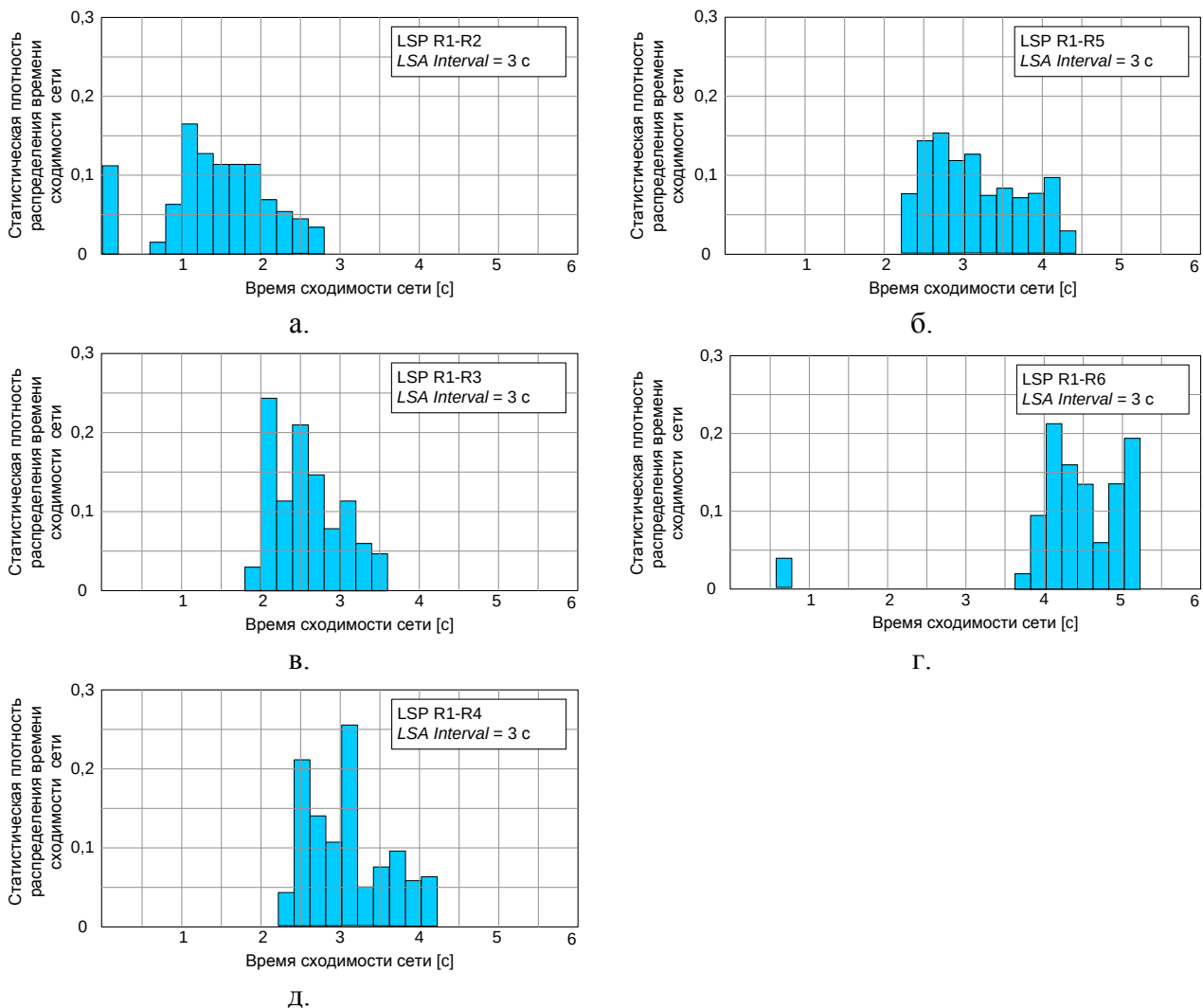


Рис. 22. Распределение статистических оценок времени сходимости при первоначальном установлении путей LSP в сети OSPF-TE [70]

В работе [70] было проведено исследование времени сходимости при моделировании как случаев отказа канала связи (рис. 23а), так и случаев отказа «цветных» подканалов отдельных длин волн в общем WDM-канале (рис. 23б). Интенсивность распространения сообщений LSA, порождаемых отказами для обоих этих случаев приведены на рис. 24а и 24б, соответственно. Общие характеристики процессов сходимости сети при двух видах рассматриваемых отказов приведены в таблице 10.

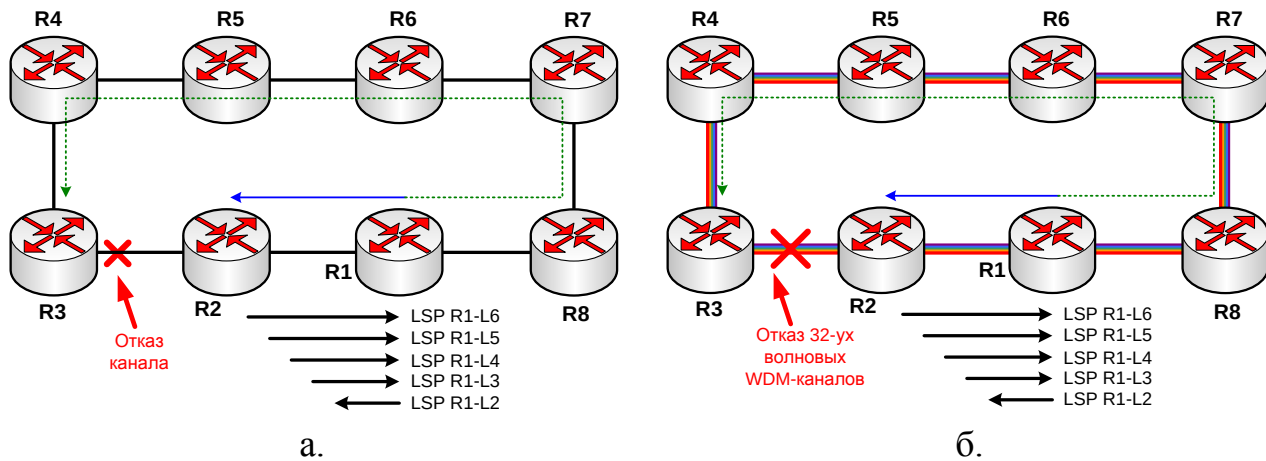


Рис. 23. Моделирование случаев отказа канала связи (а) и отказа подканалов отдельных длин волн в WDM-канале (б) [70]

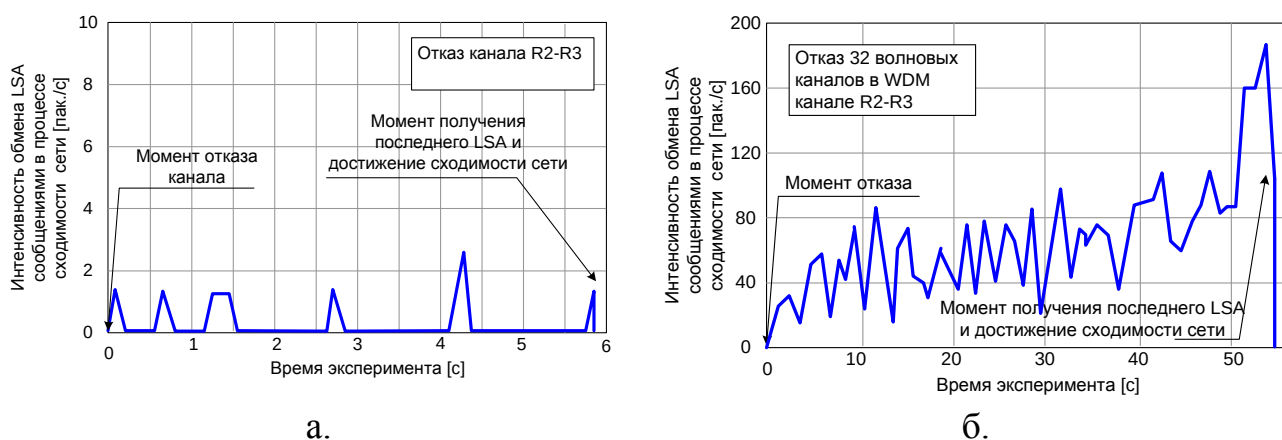


Рис. 24. Интенсивность распространения LSA сообщений, порождаемых отказами в канале связи, для случаев отказа канала связи (а) и отказа подканалов отдельных длин волн в WDM-канале (б) [70]

Таблица 10 – Характеристики процессов сходимости сети OSPF-TE [70]

	Случай отказа канала связи	Случай отказа подканалов отдельных длин волн в WDM-канале
Кол-во пакетов OSPF-TE	10	около 3400
Новые LSA сообщения	14	448
Сообщения LSA об обновлении путей	5	около 27000
Время сходимости сети	≈6 с	≈55 с

По итогам проведенного исследования в работе [70] сделаны выводы о том, что:

- время сходимости транспортной сети OSPF-TE сопоставимо с временем сходимости стандартной сети OSPF при схожей топологической сложности и одинаковой пропускной способности каналов связи;

- в случае отказа отдельный «цветных» каналов в WDM сети, время сходимости на порядок больше, чем для стандартной транспортной сети OSPF-TE без WDM. При этом доминирующим фактором, определяющим высокую длительность сходимости, является задержка синхронизации баз данных OSPF-TE, содержащих информацию о пропускных способностях отдельных WDM каналов.

Особенностью протокола OSPF-TE является необходимость поддержания в актуальном и синхронном состоянии баз данных TE о путях LSP для передачи трафика. Фактически, время сходимости в транспортной сети OSPF-TE характеризуется восстановлением синхронизации этих баз на всех маршрутизаторах сети. Данное время может зависеть как от топологических характеристик сети, так и от принятой в сети политики инжиниринга трафика. Политика инжиниринга трафика существенно влияет на сходимость, так как зачастую в транспортной сети функционируют множество наложенных виртуальных сетей, задачи маршрутизации в которых решаются с учетом приоритетности трафика, его требований к качеству обслуживания, динамически установленных виртуальных каналов и т.д. При этом, после отказа требуется восстановление работоспособности не только физической сети, но и всех наложенных виртуальных сетей.

Таким образом, общими выводами по результатам анализа исследований [30, 37, 65-70] в области сходимости сетей может быть следующее:

- задержка сходимости определяется временными параметрами протокола маршрутизации, топологией сети и пропускной способностью каналов связи;
- время сходимости сети в зависимости от топологической сложности сети для протоколов маршрутизации составляет от нескольких до десятков секунд;
- при наличии периодических групповых отказов каналов связи, время сходимости сети существенно увеличивается и стремится к стационарному статистическому распределению.

Перспективные направления исследований, ориентированных на снижение времени сходимости сети

Проведенный анализ принципов функционирования и реакции протоколов маршрутизации на отказы в сети, а также исследований в области оценки сходимости сети показал несовершенство существующих технологических решений в этой области. Как показал анализ, представленный в работах [30, 66], к наиболее сложным условиям функционирования протоколов маршрутизации относится наличие периодических групповых отказов элементов сети. Причиной таких групповых отказов могут быть изменения отношения сигнал-шум в отдельных радиоканалах, входящих в состав сети, что показано в работах [37, 71]. В таких условиях различными исследователями предложены новые направления решения задачи снижения времени сходимости и повышения устойчивости сети. К ученым, ведущим исследования в области анализа времени сходимости сетей, относятся:

Goyal M. [1, 31, 36, 72], Hosseini S. H. [1, 31, 36], Trivedi K. [1, 36], Shaikh A. [1, 36, 50], Choudhury G. [1, 36, 74], Xie W. [31, 36], Xin L. [39, 75], Ramakrishnan K. K. [72] и др. Ниже представлен обзор основных публикаций о перспективных направлениях и способах снижения времени сходимости сетей.

В работах [33, 39] предложены динамические механизмы изменения таймера Hello в протоколе OSPF, основанные на экспериментальных исследованиях авторов. Предложенный в работе [39] способ повышения сходимости основан на уменьшении интервала Hello по экспоненте каждый раз, когда количество потерянных Hello сообщений превышает заданный порог. Подобный способ описан и в работе [33], где предложена динамическая коррекция интервала ожидания восстановления связи (Dead Time), основанная на оценке уровня потерь Hello-сообщений за определенный период времени.

В работе [72] показано, что сходимость сети определяется средней сетевой связностью топологии, загрузкой сети и таймером для интервала Hello. Этот вывод также подтверждается результатами исследований, представленных в работах [1, 30, 73].

В работе [1] представлены результаты оптимального подбора значения для таймера Hello для протокола OSPF. В этой работе утверждается, что для устойчивости сети рациональным значением таймера Hello является 500 мс, что соответствует времени сходимости сети примерно в 2 с. Авторами отмечается, что дальнейшее снижение периода Hello ведет к потере устойчивости сети. В работе предлагается дополнительно ускорить сходимость, за счет приоритетной обработки пакетов Hello по отношению к другим типам сообщений OSPF, а также за счет динамически меняющихся значений времени генерации сообщений LSA и задержек вычисления алгоритма поиска путей SPF.

В работе [73] представлены результаты экспериментальных исследований по подбору оптимального значения интервала диагностики состояния смежных каналов путем рассылки пакетов Hello. Результаты моделирования в сети, состоящей из 292 узлов и 765 каналов связи, показывают шестикратное увеличение числа флуктуаций маршрутов при уменьшении Hello таймера от 500 мс до 250 мс. При этом авторы допускают, что в интересах обеспечения быстрой сходимости, интервал Hello может быть уменьшен до 275 мс, при обеспечении устойчивости сети в приемлемых пределах.

В работе [30] исследованы возможности применения в протоколе OSPF миллисекундных таймеров (1 мс для интервала рассылки сообщений Hello, и 4 мс для интервала ожидания восстановления связи (Dead Time), а также влияние таких сверхкоротких интервалов на устойчивость сетей OSPF.

В работе [74] указывается, что снижение интервала рассылки сообщений Hello с одной стороны приводит к увеличению точности диагностики отказов в сети, но с другой стороны - возрастает количество ложных тревог, которые ведут к дополнительным циклам пересчета путей, что снижает коэффициент готовности сети. При этом, как показано в работе [72], интенсивность ложных тревог увеличивается пропорционально уровню нагрузки сети и числу каналов в ней. Таким образом, оптимальное значение интервала Hello зависит от

допустимого уровня вероятности ложной тревоги, ожидаемых уровней нагрузки сети и ее топологической сложности.

Несколько другое направление повышения скорости сходимости представлено в работах [14-17, 36, 75-83], направленных не на поиск оптимальных временных параметров алгоритмов маршрутизации, а на совершенствование механизмов самого алгоритма SPF.

В работе [75] предлагается способ снижения времени сходимости сети за счет уменьшения размеров обновления таблицы маршрутизации. Данный способ, названный авторами «инкрементным обновлением FIB» (iFIB), вместо того, чтобы выводить в оперативную память таблицу маршрутизации целиком всякий раз, когда происходят изменения топологии, предусматривает выборочное обновление в таблице FIB только тех маршрутов или префиксов сетей, на которые влияет произошедшее топологическое изменение. Данный способ является развитием подхода, использованного в алгоритме iSPF, а сам способ предлагается к использованию совместно с алгоритмом iSPF, что позволит значительно уменьшить время сходимости сети.

В работах [14-17, 76] для сокращения времени перехода на новый маршрут предложены различные варианты расчета резервных путей, а также их выбора при отказе текущего маршрута, входящего в состав дерева кратчайших путей SPT. Это позволяет маршрутизатору, который идентифицировал отказ, сначала осуществить реконфигурацию маршрутов, а уже потом приступить к рассылке LSA сообщений и запуску алгоритма SPF для расчета кратчайших путей. В частности, в работах [14-17] предложены варианты сокращения вычислительной сложности выполнения алгоритма SPF за счет парных перестановок маршрутов, при выборе резервных путей.

Имеются работы по обобщению самого алгоритма Дейкстры (как правило, используемого в качестве основы алгоритма SPF) в направлении использования его для формирования как кратчайших, так и резервных путей [76], а также по динамическому исправлению ранее рассчитанного дерева кратчайших путей SPT после изменения топологии сети [78-81].

В работе [82] предлагается периодически кэшировать результаты работы алгоритма SPF и использовать кэшируемую информацию в случае восстановления отказавшего канала или узла без повторного пересчета топологии. Кроме того, кэширование позволяет передавать минимальное количество данных между маршрутизаторами, которые используются для синхронизации баз данных о кэшированных состояниях топологии.

Чрезвычайно интересным способом является так называемая «корреляция LSA», которая является способом оптимизации вычисления SPF, предложенным в работе [36] и развивающим способ проверки каждого получаемого LSA на логическую связь с ранее полученными LSA-сообщениями, определенного в RFC 2328 [32]. В работе [36] авторами показано, что параметры задержки вычисления алгоритма SPF, которые используют фиксированный или экспоненциально замедляющийся временной интервал, неэффективны в случаях, если изменения происходят в одних и тех же каналах. В данной работе предлагается использовать отдельные LSA

сообщения, но не в качестве признака изменения топологии (с последующей инициализацией пересчета SPF), а в качестве признака нестабильного состояния канала или области сети. Предлагается механизм, при котором отдельные LSA сообщения не будут приводить к расчету алгоритма SPF, а будут накапливаться в течение определенного интервала и анализироваться на предмет поиска корреляционных зависимостей в изменении топологии. Вычисление такой корреляционной зависимости позволит определить область смежных узлов, рассылающих LSA из-за нестабильного состояния каналов между ними, а также возможные общие дестабилизирующие факторы, воздействующие на отдельные области сети. Данный подход позволяет провести анализ изменений топологии сети в целом на некотором промежутке времени и установить общие закономерности этого процесса. Авторами предложен корреляционный анализ по следующим параметрам: идентификаторы каналов; идентификаторы узлов; параметры данных, передаваемых по каналам связи и др. В случае выявления корреляционных закономерностей в процессе изменения топологии сети, инициируется алгоритм SPF с целью формирования дерева путей, исключая область топологических изменений.

Фактически, подход, предложенный авторами работы [36], может быть положен в основу целого комплекса способов обнаружения преднамеренных деструктивных воздействий, направленных на дестабилизацию сети связи за счет преднамеренного деструктивного воздействия на ее отдельные каналы и узлы.

Заключение

Результаты обобщенного анализа принципов функционирования протоколов маршрутизации, а также влияния их временных параметров на время сходимости сети, представленные в статье, могут быть использованы для обоснования новых алгоритмических решений при маршрутизации трафика в сетях, на которые воздействуют различного рода дестабилизирующие факторы. Представленный в работе анализ перспективных направлений совершенствования протоколов маршрутизации может быть использован для совершенствования таких протоколов как: OSPF, OSPF-TE, IS-IS, IGRP, EIGRP. Кроме того, ряд рассматриваемых в статье решений может быть положен в основу разработки протоколов маршрутизации для мобильных MANET сетей, построенных на основе Mesh-технологий.

Исследования эффективности функционирования протоколов маршрутизации сетей связи выполнены при государственной поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 13-07-97518 и поддержке Департаментом приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки РФ – грантом Президента РФ № МК-755.2012.10.

Автор выражает благодарность Михайлову Р.Л. за плодотворное обсуждение материалов и помощь в подготовке текста статьи.

Литература

1. Goyal M., Soperi M., Baccelli E., Choudhury G., Shaikh A., Hosseini S. H., Trivedi K. Improving Convergence Speed and Scalability in OSPF: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2012. № 14 (2). pp. 443-463. doi: 10.1109/SURV.2011.011411.00065. HAL Id: hal-00651596. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00651596> (дата доступа 01.05.2015).
2. Markopoulo A., Iannaccone G., Bhattacharya S., Chua C., Ganjali Y., Diot C. Characterization of failures in an operational IP backbone network // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2008. vol. 16. № 4.
3. Labovitz C., Ahuja A., Jahanian F. Experimental study of internet stability and backbone failures // Proc. The 29-th International Symposium on Fault-Tolerant Computing. – Madison (WI, USA), 1999. – pp. 278-285. doi: 10.1109/FTCS.1999.781062
4. Ganjali Y., Bhattacharyya S., Diot C. Limiting the impact of failures on network performance // Sprint ATL Tech. Res. Rep., Tech. Rep. RR04-ATL-020666, 2003. – URL: <https://research.sprintlabs.com/publications/uploads/RR04-ATL-020666.pdf> (дата доступа 01.05.2015).
5. Поповский В. В., Волотка В. С. Методы анализа динамических структур телекоммуникационных систем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 5/2 (65). С. 18-22.
6. Поповский В. В., Волотка В. С. Математическое моделирование надежности инфокоммуникационных систем // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2014. № 3. С. 5-9.
7. Поповский В. В., Лемешко А. В., Мельникова Л. И., Андрушко Д. В. Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях // Прикладная радиоэлектроника. 2005. Т. 4. № 4. С. 372-382. – URL: http://alem.ucoz.ua/_ld/0/10_Lemeshko_PRE_20.pdf (дата доступа 01.05.2015).
8. Лемешко А. В., Евсеева О. Ю., Дробот О. А. Методика выбора независимых путей с определением их количества при решении задач многопутевой маршрутизации // Праці УНДІРТ. 2006. № 4 (48). С. 69-73. – URL: http://alem.ucoz.ua/_ld/0/14_Lemeshko_UNIIRT.pdf (дата доступа 01.05.2015).
9. Лемешко А. В., Козлова Е. В., Романюк А. А. Математическая модель отказоустойчивой маршрутизации, представленная алгебраическими уравнениями состояния MPLS-сети // Системи обробки інформації. 2013. № 2 (109). С. 217-220.
10. Попков В. К. Математические модели связности. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2006. 490 с.
11. Попков В. К., Блукке В. П., Дворкин А. Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63-78.
12. Сорокин А. А., Дмитриев В. Н. Описание систем связи с динамической топологией сети при помощи модели «мерцающего» графа //

Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 134-139.

13. Сорокин А. А., Дмитриев В. Н., Чан Куок Тоан, Резников П. С. Оценка результатов использования протокола RIP в системах связи с динамической топологией сети методом имитационного моделирования // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 4. С. 85-93.

14. Перепелкин Д. А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 1 (47). С. 84-91.

15. Перепелкин Д. А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации? на базе протокола IGRP при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 4 (42). С. 33-38.

16. Перепелкин Д. А. Динамическое формирование структуры и параметров линий связи корпоративной сети на основе данных о парных перестановках маршрутов // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 52-60.

17. Корячко В. П., Перепелкин Д. А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 236 с.

18. Мейкшан В. И. Анализ влияния отказов оборудования на функционирование мультисервисной сети с адаптивной маршрутизацией // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. Технические науки. 2010. № 2 (15). С. 69-80.

19. Горев П. Г., Назаров А. С., Пасечников И. И. Определение связности в путевом пространстве состояний телекоммуникационной сети // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2012. Т. 17. № 5. С. 1360-1363.

20. Литвинов К. А., Пасечников И. И. Подходы к решению задачи маршрутизации в современных телекоммуникационных системах // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 1. С. 64-69.

21. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю. Ю. Громов, В. О. Драчев, К. А. Набатов, О. Г. Иванова. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. 152 с.

22. Ковальков Д. А. Математические модели оценки надежности мультисервисного узла доступа // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 64-71.

23. Горбунов И. Э. Методология анализа и синтеза реконфигурируемых топологий мобильной связи // Математичні машини і системи. 2006. № 2. С. 48-59.

24. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54-60.

25. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. № 7 (59). С. 956-961.

26. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на функционирование расширенного протокола маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP) // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 2 (61). С. 223-229.

27. Бачинский В. А., Гиоргизова-Гай В. Ш. Выбор протокола динамической маршрутизации в корпоративной ip-сети // Системні дослідження та інформаційні технології. 2011. № 1. С. 99-110.

28. Султанахметов Д. Быстрая сходимость OSPF. Таймеры протокола OSPF // Network-Lab [Электронный ресурс]. 09.01.2014. URL: <http://network-lab.ru/byistraya-shodimost-ospf-taymeryi-protokola-ospf/> (дата доступа 01.05.2015).

29. Moy J. T. OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol. Addison-Wesley Professional, 1998. 338 p.

30. Tsegaye Y., Geberehana T. OSPF Convergence Times. Master of Science Thesis in the Programme Networks and Distributed Systems. Chalmers University of Technology. Göteborg (Sweden), 2012. 77 p. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/184363/184363.pdf> (дата доступа 01.05.2015).

31. Goyal M., Xie W., Hosseini S. H., Vairavan K., Rohm D. Improving OSPF Dynamics on a Broadcast LAN // Simulation. 2006. vol. 82. № 2. pp. 107-129. doi: 10.1177/0037549706065924

32. Moy J. RFC 2328. OSPF Version 2 // Network Working Group. Request for Comments. Ascend Communications Inc, 1998.

33. Amir S., Biswajit N. Improving Network Convergence Time and Network Stability of an OSPF-Routed IP Network // Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3462. pp. 469-485. doi: 10.1007/11422778_38

34. Choudhury G. RFC 4222. Prioritized Treatment of Specific OSPF Version 2 Packets and Congestion Avoidance // Network Working Group, Request for Comments. AT&T Publ., 2005.

35. Cisco IOS Release 12.2(14)S. OSPF Update Packet-Pacing Configurable Timers // Cisco [Электронный ресурс], 2010. URL: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/12_2s/feature/guide/fsospfct.html (дата доступа 01.05.2015).

36. Goyal M., Xie W., Soperi M., Hosseini S. H., Vairavan K. Scheduling routing table calculations to achieve fast convergence in OSPF protocol // Proc. IEEE BROADNETS 2007. 2007. pp. 863–872. doi: 10.1109/BROADNETS.2007.4550524

37. Zaballo A., Seguí C. Analysis and simulation of IGP routing protocols // University Ramon Llull (La Salle Engineering), Barcelona (Spain). 2006. URL: <http://users.salleurl.edu/~zaballo/opnet/Trame.pdf> (дата доступа 01.05.2015).

38. Alaettinoglu C., Jacobson V., Yu H. Towards milli-second IGP convergence // IETF Draft. – 2000.
39. Fang W., Shanzhi C., Xin L., Yuhong L. A Route Flap Suppression Mechanism Based on Dynamic Timers in OSPF Network // The 9-th International Conference for Young Computer Scientists - IEEE, 2008.
40. Katz D., Ward D. RFC 5880. Bidirectional forwarding detection (BFD) // Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Standards Track), 2010.
41. Bidirectional Forwarding Detection for OSPF. Cisco, 2005. 18 p. URL: https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk648/tk365/tk480/technologies_white_paper0900aecd80244005.pdf (дата доступа 01.05.2015).
42. Cisco IOS Software Releases 12.0 S. IP Event dampening. // Cisco [Электронный ресурс], 2010. URL: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/12_0s/feature/guide/s_ipevdp.html (дата доступа 01.05.2015).
43. Kolon M. C., Doyle J., Christensen S. The Complete Reference Juniper Network Routers. McGraw-Hill Osborne Media, 2002.
44. Baccelli E., Jacquet P., Nguyen D., Clausen T. RFC 5449. OSPF multipoint relay (MPR) extension for ad hoc networks // Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Experimental). LIX, Ecole Polytechnique, 2009.
45. Roy A., Chandra M. RFC 5820. Extensions to OSPF to support mobile ad hoc networking // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Experimental), 2010.
46. Ogier R., Spagnolo P. RFC 5614. Mobile Ad-Hoc network MANET extension of OSPF using connected dominating set CDS flooding // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Experimental), 2009.
47. Raj A., Ibe O. A Survey of IP and Multiprotocol Label Switching Fast Reroute Schemes // Comput. Netw. 2007. vol. 51. № 8. pp. 1882–1907.
48. Rosen E., Viswanathan A., Callon R., RFC 3031. Multiprotocol label switching architecture // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track), 2001.
49. Davie B., Rekhter Y. MPLS: Technology and Applications. Morgan Kaufmann, 2000. 287 p.
50. Shaikh A., Wang D., Li G., Yates J., Kalmanek C. An efficient algorithm for OSPF subnet aggregation // Proc. 11-th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 2003. pp. 200-209. doi: 10.1109/ICNP.2003.1249771
51. Coltun R., Ferguson D., Moy J., Lindem A. RFC 5340. OSPF for IPv6 // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track), 2001. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5340.txt> (дата доступа 01.05.2015).
52. Moy J., Pillay-Esnault P., Lindem A. RFC 3623. Graceful OSPF Restart // Network Working Group, Request for Comments, 2003. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3623> (дата доступа 01.05.2015).
53. Li T., Cole B., Morton P., Li D. RFC 2281. Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP) // Network Working Group, Request for Comments (Informational), 1998. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2281.txt> (дата доступа 01.05.2015).
54. Гребешков А. Ю. Управление сетями электросвязи по стандарту TMN: учеб. пособие. – М.: Радио и связь, 2004. – 156 с.

55. Kompella K., Rekhter Y. RFC 4203. OSPF extensions in support of generalized multi-protocol label switching (GMPLS) // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track), 2005. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc4203.txt> (дата доступа 01.05.2015)
56. Pan P., Swallow G., Atlas A. RFC 4090. Fast reroute extensions to RSVP-TE for LSP tunnels // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track), 2005.
57. Atlas A., Zinin A. RFC 5286. Basic specification for IP fast reroute: Loop-free alternates // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track), 2008.
58. Shand M., Bryant S. RFC 5714. IP fast reroute framework // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Informational), 2010.
59. Shand M., Bryant S., Previdi S., IP fast reroute using not-via addresses // Network Working Group, Internet-Draft (Experimental), 2010. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-rtgwg-ipfrr-notvia-addresses-06> (дата доступа 01.05.2015).
60. Atlas A. U-turn alternates for IP/LDP fast-reroute // Network Working Group, Internet-Draft (Experimental), 2006. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-atlas-ip-local-protect-uturn-03> (дата доступа 01.05.2015).
61. Psenak P., Mirtorabi S., Roy A., Nguyen L., Pillay-Esnault P. RFC 4915. Multi-topology (MT) routing in OSPF // Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Standards Track), 2007.
62. Simpson W. RFC 1853. IP in IP tunneling // Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Informational), 1995.
63. Hanks S., Li T., Farinacci D., Traina P. RFC 1701. Generic routing encapsulation (GRE) // Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Informational), 1994.
64. Ayari N., Barbaron D., Lefevre L., Primet P. Fault tolerance for highly available internet services: concepts, approaches, and issues // IEEE Communication Surveys and Tutorials. 2008. vol. 10. № 2. pp. 34-46. doi: 10.1109/COMST.2008.4564478
65. Dilber M. N., Raza A. Analysis of successive Link Failures effect on RIP and OSPF Convergence time delay // International Journal of Advances in Science and Technology. 2014. pp. 42-48. URL: <http://sciencepublication.org/documents/sp/7.pdf> (дата доступа 01.05.2015).
66. Zhao D., Hu X., Wu C. A Study on the Impact of Multiple Failures on OSPF Convergence // International Journal of Hybrid Information Technology. 2013. vol. 6. № 3. pp. 75-74. URL: http://www.sersc.org/journals/IJHIT/vol6_no3_2013/7.pdf (дата доступа 01.05.2015).
67. Sankar D., Lancaster D. Routing Protocol Convergence Comparison using Simulation and Real Equipment // Advances in Communications, Computing, Networks and Security. 2013. Vol. 10. pp. 186-194.
68. Антонова А.А. Оценка эффективности протоколов динамической маршрутизации при передаче потокового видео // Автоматизация и управление

- в технических системах. 2013. № 4.2. URL: <http://auts.esrae.ru/7-151> (дата обращения: 02.05.2015). doi: 10.12731/2306-1561-2013-4-36
69. Pun H. Convergence Behavior of RIP and OSPF Network Protocols. Ph.D. thesis. B.A.Sc., University of British Columbia. 2001. 59 p. URL: <http://www2.ensc.sfu.ca/~ljilja/cnl/pdf/hubert.pdf> (дата обращения: 02.05.2015).
70. Huang S., Kitayama K., Cugini F., Paolucci F., Giorgetti A., Valcarenghi L., Castoldi P. An Experimental Analysis on OSPF-TE Convergence Time // Asia Pacific Optical Communications – International Society for Optics and Photonics. 2008. Vol. 7137. doi: 10.1117/12.803224
71. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (дата доступа 01.03.2015)
72. Goyal M., Ramakrishnan K. K., Feng W. Achieving Faster Failure Detection in OSPF Networks // Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC-2003). 2003. Vol. 1. pp. 296-300. doi: 10.1109/ICC.2003.1204188
73. Basu A., Riecke J. Stability issues in OSPF routing // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2001. Vol. 31. № 4. pp. 225-236.
74. Choudhury G., Ash G., Manral V., Maunder A., Sapozhnikova V., Prioritized treatment of specific OSPF packets and congestion avoidance: algorithms and simulations // Technical Report. AT&T, Tech. Rep. Publ., 2003.
75. Liu Y., Zhao X., Nam K., Wang L., Zhang B. Incremental Forwarding Table Aggregation // GLOBECOM 2010. Miami, Florida, USA, 2010. pp. 1-6.
76. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2(69). С. 71-78.
77. Pu J., Manning E., Shoja G. C., Routing Reliability Analysis of Partially Disjoint Paths // Proc. IEEE Conference on Communications, Computers, and Signal Processing. Victoria, BC, Canada. 2001. Vol. 1. pp. 79-82.
78. McQuillan J., Richer I., Rosen E. The New Routing Algorithm for the ARPANET // IEEE Transactions on Communications. Vol. 28. № 5. 1980.
79. Franciosa P., Frigioni D., Giaccio R. Semi-dynamic Shortest Paths and Breadth-first Search in Digraphs // Proc. The 14-th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. 1997. pp. 33-46.
80. Frigioni D., Marchetti-Spaccamela A., Nanni U. Fully Dynamic Output Bounded Single Source Shortest Path Problem // Proc. ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. 1996.
81. Ramalingam G., Reps T. An Incremental Algorithm for a Generalization of the Shortest-Path Problem // Journal of Algorithms. 1996. Vol. 21. pp. 267-305.
82. Villamizar C. Convergence and restoration techniques for ISP interior routing // NANOG [Электронный ресурс], 2002. URL: <http://www.nanog.org/mtg-0206/ppt/curtis.pdf> (дата доступа 01.05.2015).

83. Labovitz C., Ahuja A., Bose A., Jahanian F. Delayed Internet Routing Convergence // *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*. 2001. Vol. 9. № 3. pp. 293-306.

84. Labovitz C., Ahuja A., Wattenhofer R., Venkatachary S. The impact of Internet policy and topology on delayed routing convergence // *Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings (INFOCOM 2001)*. – IEEE, 2001. Vol. 1. pp. 537-546.

References

1. Goyal M., Soperi M., Baccelli E., Choudhury G., Shaikh A., Hosseini S. H., Trivedi K. Improving Convergence Speed and Scalability in OSPF: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2012. no. 14(2). pp. 443-463. doi: 10.1109/SURV.2011.011411.00065. HAL Id: hal-00651596. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00651596> (accessed 01 May 2015).

2. Markopoulo A., Iannaccone G., Bhattacharya S., Chua C., Ganjali Y., Diot C. Characterization of failures in an operational IP backbone network. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, vol. 16, no. 4.

3. Labovitz C., Ahuja A., Jahanian F. Experimental study of internet stability and backbone failures. *Proc. The 29-th International Symposium on Fault-Tolerant Computing*, Madison (WI, USA), 1999, pp. 278-285. doi: 10.1109/FTCS.1999.781062

4. Ganjali Y., Bhattacharyya S., Diot C. Limiting the impact of failures on network performance. *Sprint ATL Tech. Res. Rep., Tech. Rep. RR04-ATL-020666*, 2003. Available at: <https://research.sprintlabs.com/publications/uploads/RR04-ATL-020666.pdf> (accessed 01 May 2015).

5. Popovskii V. V., Volotka V. S. Metody analiza dinamicheskikh struktur telekommunikatsionnykh sistem [Methods of analysis of dynamic structures of telecommunication systems]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2013, vol. 65, no. 5/2, pp. 18-22 (in Russian).

6. Popovskii V. V., Volotka V. S. Matematicheskoe modelirovanie nadezhnosti infokommunikatsionnykh sistem [Mathematical modelling of secure information and communication systems]. *Telekomunikacii ta informacii ta tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 5-9 (in Russian).

7. Popovskii V. V., Lemeshko A. V., Mel'nikova L. I., Andrushko D. V. Obzor i sravnitel'nyi analiz osnovnykh modelei i algoritmov mnogoputevoi marshrutizatsii v mul'tiservisnykh telekommunikatsionnykh setiakh [Basic models and algorithms of multipath routing for multi-service telecommunication networks]. *Prikladnaia radioelektronika*, 2005, vol. 4, no. 4, pp. 372-382. Available at: http://alem.ucoz.ua/_ld/0/10_Lemeshko_PRE_20.pdf (дата доступа 01.05.2015) (in Russian).

8. Lemeshko A. V., Evseeva O. Yu., Drobot O. A. The Method of Paths Independents Choice with Definition of their Quantity at the Solving of Multipath Routing Problem. *Praci UNDIRT*, 2006, vol. 48, no. 4, pp. 69-73. Available at: http://alem.ucoz.ua/_ld/0/14_Lemeshko_UNIIRT.pdf (accessed: 01 May 2015) (in Russian).

9. Lemeshko O. V., Kozlova H. V., Romanyuk A. O. A Mathematical Model of Fault-tolerant Routing, Presented Algebraic Equations of MPLS-Network State. *Systemy obrobky informacii*, 2013, vol. 109, no. 2, pp. 217-220 (in Russian).

10. Popkov V. K. *Mathematical Models of Connection*. Novosibirsk, ICM&MG SB RAS Publ., 2006. 490 p. (in Russian).

11. Popkov V. K., Blukke V. P., Dvorkin A. B. Modeli analiza ustoichivosti i zhivuchesti informatsionnykh setei [Model analysis the sustainability and survivability of information networks]. *Problemy informatiki*, 2009, no. 4, pp. 63-78 (in Russian).

12. Sorokin A. A., Dmitriev V. N. Description of Communication Systems with Dynamic Network Topology by Means of Model "Flickering" Graph. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics*, 2009, no. 2. pp. 134-139 (in Russian).

13. Sorokin A. A., Dmitriev V. N., Tran Quoc Toan, Reznikov P. S. Evaluation of the Results of Using the RIP Protocol in Communication Systems with Dynamic Network Topology Using Simulation Method. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics*, 2014, no. 4, pp. 85-93 (in Russian).

14. Perepelkin D. A. Algoritm parnykh perestanovok marshrutov na baze protokola OSPF pri dinamicheskom otkaze uzlov i linii svyazi korporativnoi seti [The algorithm of pairwise permutations of routes for OSPF Protocol under condition dynamic failure of nodes and communication lines network]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 47, no. 1, pp. 84-91 (in Russian).

15. Perepelkin D. A. Algoritm adaptivnoi uskorennoi marshrutizatsii na baze protokola IGRP pri dinamicheskom otkaze uzlov i linii svyazi korporativnoi seti [The algorithm is adaptive accelerated routing for IGRP Protocol under condition dynamic failure of nodes and communication lines network]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 42, no. 4, pp. 33-38 (in Russian).

16. Perepelkin D. A. Dynamic Corporate Network Structure and Communication Links Loading Formation Based on Routes Pairs Permutations Data. *Informatsionnye tekhnologii*, 2014, no. 4, pp. 52-60 (in Russian).

17. Koriachko V. P., Perepelkin D. A. *Analiz i proektirovanie marshrutov peredachi dannykh v korporativnykh setiakh* [Analysis and design of routes of transmission of data in corporate networks]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2012. 236 p. (in Russian).

18. Meikshan V. I. Analysis of Equipment Faults Influence on Performance of Multiservice Network with Adaptive Routing. *Proceedings of the Russian higher school academy of sciences*. 2010, vol. 15, no 2, pp. 69-80 (in Russian).

19. Gorev P. G., Nazarov A. S., Pasechnikov I. I. Opredelenie svyaznosti v putevom prostranstve sostoianii telekommunikatsionnoi seti [The definition of connectivity in the route state-space telecommunication network]. *Tambov University reports. Series: Natural and Technical sciences*, 2012, vol. 17, no. 5, pp. 1360-1363 (in Russian).

20. Litvinov K. A., Pasechnikov I. I. Podkhody k resheniiu zadachi marshrutizatsii v sovremennykh telekommunikatsionnykh sistemakh [The routing problem in modern telecommunication systems]. *Tambov University reports. Series: Natural and Technical sciences*, 2013. vol. 18, no. 1, pp. 64-69 (in Russian).

21. Gromov Ju. Ju., Drachev V. O., Nabatov K. A., Ivanova O. G. *Sintez i analiz zhivuchesti setevykh sistem: monografiya* [Synthesis and Analysis Net Systems Reliability]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007, 152 p. (in Russian).

22. Kovalkov D. A. Matematicheskie modeli otsenki nadezhnosti mul'tiservisnogo uzla dostupa [Mathematical model for reliability evaluation of multi-service access node network]. *Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 2, pp. 64-71 (in Russian).

23. Gorbunov I. E. Metodologiya analiza i sinteza rekonfiguriruemyykh topologii mobil'noi svyazi [The methodology of analysis and synthesis of reconfigurable topologies for mobile communication]. *Matematychni mashyny i systemy*, 2006, no. 2, pp. 48-59 (in Russian).

24. Egunov M. M., Shuvalov V. P. Analiz strukturnoi nadezhnosti transportnoi seti [Structural Reliability Analysis of Transport Network]. *Vestnik SibGUTY*, 2012, no. 1, pp. 54–60 (in Russian).

25. Makarenko S. I. Analiz vozdetsviia prednamerennykh pomekh na setevoi uroven' modeli vzaimodeystviia otkrytykh sistem i funktsionirovaniye protokola marshrutizatsii otsenki sostoianiia kanala (OSPF) [Analysis of the Impact of Intentional Interference at the Network Level Model of Open Systems Interaction and Functioning of the Routing Protocol Assessment Channel (OSPF)]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2009, vol. 59, no. 7, pp. 956-961 (in Russian).

26. Makarenko S. I. Analiz vozdetsviia prednamerennykh pomekh na funktsionirovaniye rasshirennogo protokola marshrutizatsii vnutrennego shliuza (EIGRP) [Analysis of Affecting Intended Interferences on the Operation of the Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 61, no. 2, pp. 223-229 (in Russian).

27. Bachinskii V. A., Giorgizova-Gai V. Sh. Vybory protokola dinamicheskoi marshrutizatsii v korporativnoi ip-seti [The choice of dynamic routing protocol in a corporate IP network]. *System Research & Information Technologies*, 2011, no. 1, pp. 99-110 (in Russian).

28. Sultanakhmetov D. Bystraia skhodimost' OSPF. Taimery protokola OSPF [Fast convergence OSPF. The OSPF timers]. *Network-Lab*, 09 January 2014. Available at: <http://network-lab.ru/byistraya-shodimost-ospf-taymeryi-protokola-ospf/> (accessed 01 May 2015) (in Russian).

29. Moy J. T. *OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol*. Addison-Wesley Professional, 1998. 338 p.

30. Tsegaye Y., Geberehana T. *OSPF Convergence Times. Master of Science Thesis in the Programme Networks and Distributed Systems*. Chalmers University of Technology. Göteborg (Sweden), 2012. 77 p. Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/184363/184363.pdf> (accessed 01 May 2015).

31. Goyal M., Xie W., Hosseini S. H., Vairavan K., Rohm D. Improving OSPF Dynamics on a Broadcast LAN. *Simulation*, 2006, vol. 82, no. 2, pp. 107-129. doi: 10.1177/0037549706065924
32. Moy J. RFC 2328. OSPF Version 2. *Network Working Group. Request for Comments*. Ascend Communications Inc, 1998.
33. Amir S., Biswajit N. Improving Network Convergence Time and Network Stability of an OSPF-Routed IP Network. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, Vol. 3462, pp 469-485. doi: 10.1007/11422778_38.
34. Choudhury G. RFC 4222. Prioritized Treatment of Specific OSPF Version 2 Packets and Congestion Avoidance. *Network Working Group, Request for Comments*. AT&T Publ., 2005.
35. Cisco IOS Release 12.2(14)S. *OSPF Update Packet-Pacing Configurable Timers*. Cisco, 2010. Available at: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/12_2s/feature/guide/fsospfct.html (accessed 01 May 2015).
36. Goyal M., Xie W., Soperi M., Hosseini S. H., Vairavan K. Scheduling routing table calculations to achieve fast convergence in OSPF protocol. *Proc. IEEE BROADNETS 2007*, 2007, pp. 863–872. doi: 10.1109/BROADNETS.2007.4550524.
37. Zaballo A., Seguí C. *Analysis and simulation of IGP routing protocols*. University Ramon Llull (La Salle Engineering), Barcelona (Spain). 2006. Available at: <http://users.salleurl.edu/~zaballo/opnet/Trame.pdf> (accessed 01 May 2015).
38. Alaettinoglu C., Jacobson V., Yu H. Towards milli-second IGP convergence. *IETF Draft*, 2000.
39. Fang W., Shanzhi C., Xin L., Yuhong L. A Route Flap Suppression Mechanism Based on Dynamic Timers in OSPF Network. *The 9-th International Conference for Young Computer Scientists*, IEEE, 2008.
40. Katz D., Ward D. RFC 5880. Bidirectional forwarding detection (BFD). *Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Standards Track)*, 2010.
41. *Bidirectional Forwarding Detection for OSPF*. Cisco, 2005. 18 p. Available at: https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk648/tk365/tk480/technologies_white_paper0900aecd80244005.pdf (accessed 01 May 2015).
42. Cisco IOS Software Releases 12.0 S. *IP Event dampening*. Cisco, 2010. Available at: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/12_0s/feature/guide/s_ipevdp.html (accessed 01 May 2015).
43. Kolon M. C., Doyle J., Christensen S. *The Complete Reference Juniper Network Routers*. McGraw-Hill Osborne Media, 2002.
44. Baccelli E., Jacquet P., Nguyen D., Clausen T. RFC 5449. OSPF multipoint relay (MPR) extension for ad hoc networks. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Experimental)*, LIX, Ecole Polytechnique, 2009.
45. Roy A., Chandra M. RFC 5820. Extensions to OSPF to support mobile ad hoc networking. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Experimental)*, 2010.
46. Ogier R., Spagnolo P. RFC 5614. Mobile Ad-Hoc network MANET extension of OSPF using connected dominating set CDS flooding. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Experimental)*, 2009.

47. Raj A., Ibe O. A Survey of IP and Multiprotocol Label Switching Fast Reroute Schemes. *Comput. Netw.*, 2007, vol. 51, no. 8, pp. 1882–1907.
48. Rosen E., Viswanathan A., Callon R., RFC 3031. Multiprotocol label switching architecture. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track)*, 2001.
49. Davie B., Rekhter Y. *MPLS: Technology and Applications*. Morgan Kaufmann, 2000. 287 p.
50. Shaikh A., Wang D., Li G., Yates J., Kalmanek C. An efficient algorithm for OSPF subnet aggregation. *Proc. 11-th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2003, pp. 200-209. doi: 10.1109/ICNP.2003.1249771
51. Coltun R., Ferguson D., Moy J., Lindem A. RFC 5340. OSPF for IPv6. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track)*, 2001. Available at: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5340.txt> (accessed 01 May 2015).
52. Moy J., Pillay-Esnault P., Lindem A. RFC 3623. Graceful OSPF Restart. *Network Working Group, Request for Comments*, 2003. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3623> (accessed 01 May 2015).
53. Li T., Cole B., Morton P., Li D. RFC 2281. Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP). *Network Working Group, Request for Comments (Informational)*, 1998. Available at: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2281.txt> (accessed 01 May 2015).
54. Grebeshkov A.Iu. *Upravlenie setiami elektrosvyazi po standartu TMN* [Network Management Using Concept of Telecommunication Management Network]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2004. 156 p. (in Russian).
55. Kompella K., Rekhter Y. RFC 4203. OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS). *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track)*, 2005. Available at: <https://www.ietf.org/rfc/rfc4203.txt> (accessed 01 May 2015)
56. Pan P., Swallow G., Atlas A. RFC 4090. Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP tunnels. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track)*, 2005.
57. Atlas A., Zinin A. RFC 5286. Basic specification for IP fast reroute: Loop-free Alternates. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Standards Track)*, 2008.
58. Shand M., Bryant S. RFC 5714. IP fast reroute framework. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Informational)*, 2010.
59. Shand M., Bryant S., Previdi S., IP fast reroute using not-via addresses. *Network Working Group, Internet-Draft (Experimental)*, 2010. Available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-rtgwg-ipfrr-notvia-addresses-06> (accessed 01 May 2015).
60. Atlas A. U-turn alternates for IP/LDP fast-reroute. *Network Working Group, Internet-Draft (Experimental)*, 2006. Available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-atlas-ip-local-protect-uturn-03> (accessed 01 May 2015).
61. Psenak P., Mirtorabi S., Roy A., Nguyen L., Pillay-Esnault P. RFC 4915. Multi-topology (MT) routing in OSPF. *Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Standards Track)*, 2007.

62. Simpson W. RFC 1853. IP in IP tunneling. *Internet Engineering Task Force, Request For Comments (Informational)*, 1995.
63. Hanks S., Li T., Farinacci D., Traina P. RFC 1701. Generic routing encapsulation (GRE). *Internet Engineering Task Force, Request for Comments (Informational)*, 1994.
64. Ayari N., Barbaron D., Lefevre L., Primet P. Fault tolerance for highly available internet services: concepts, approaches, and issues. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 34-46. doi: 10.1109/COMST.2008.4564478
65. Dilber M. N., Raza A. Analysis of successive Link Failures effect on RIP and OSPF Convergence time delay. *International Journal of Advances in Science and Technology*, 2014, pp. 42-48. Available at: <http://sciencepublication.org/documents/sp/7.pdf> (accessed 01 May 2015).
66. Zhao D., Hu X., Wu C. A Study on the Impact of Multiple Failures on OSPF Convergence. *International Journal of Hybrid Information Technology*. 2013. vol. 6. no. 3. pp. 75-74. Available at: http://www.sersc.org/journals/IJHIT/vol6_no3_2013/7.pdf (accessed 01 May 2015).
67. Sankar D., Lancaster D. Routing Protocol Convergence Comparison using Simulation and Real Equipment. *Advances in Communications, Computing, Networks and Security*, 2013, Vol. 10, pp. 186-194.
68. Antonova A. A. Performance evaluation in dynamic routing protocol streaming video. *Automation and Control in Technical Systems*, 2013, no. 4.2. Available at: <http://auts.esrae.ru/7-151> (accessed: 02 May 2015). doi: 10.12731/2306-1561-2013-4-36
69. Pun H. *Convergence Behavior of RIP and OSPF Network Protocols*. Ph.D. Thesis. B.A.Sc., University of British Columbia, 2001. 59 p. Available at: <http://www2.ensc.sfu.ca/~ljilja/cnl/pdf/hubert.pdf> (accessed: 02 May 2015).
70. Huang S., Kitayama K., Cugini F., Paolucci F., Giorgetti A., Valcarenghi L., Castoldi P. An Experimental Analysis on OSPF-TE Convergence Time. *Asia Pacific Optical Communications – International Society for Optics and Photonics*, 2008, vol. 7137. doi:10.1117/12.803224
71. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. Issledovanie kanal'nykh i setevykh parametrov kanala svyazi v usloviakh dinamicheskoi izmeniaiushcheisya signal'no-pomekhovoi obstanovki [The Research of Data Link Layer and Network Layer Parameters of Communication Channel in the Conditions Dynamic Vary of the Signal and Noise Situation]. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (accessed 3 May 2015) (in Russian).
72. Goyal M., Ramakrishnan K. K., Feng W. Achieving Faster Failure Detection in OSPF Networks. *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC-2003)*, 2003, vol. 1, pp. 296-300. doi: 10.1109/ICC.2003.1204188
73. Basu A., Riecke J. Stability issues in OSPF routing. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2001, vol. 31, no. 4, pp. 225-236.

74. Choudhury G., Ash G., Manral V., Maunder A., Sapozhnikova V., *Prioritized treatment of specific OSPF packets and congestion avoidance: algorithms and simulations*. Technical Report, AT&T Publ., 2003.
75. Liu Y., Zhao X., Nam K., Wang L., Zhang B. Incremental Forwarding Table Aggregation. *GLOBECOM 2010*, Miami, Florida, USA, 2010. pp. 1-6.
76. Tsvetov K. U., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Forming of Reserve Paths Based on Dijkstra's Algorithm in the Aim of the Enhancement of the Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, vol. 69, no. 2, 2014, pp. 71-78 (in Russian).
77. Pu J., Manning E., Shoja G. C., Routing Reliability Analysis of Partially Disjoint Paths. *Proc. IEEE Conference on Communications, Computers, and Signal Processing*, Victoria (BC, Canada), 2001, vol. 1, pp. 79-82.
78. McQuillan J., Richer I., Rosen E. The New Routing Algorithm for the ARPANET. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 5, 1980.
79. Franciosa P., Frigioni D., Giaccio R. Semi-dynamic Shortest Paths and Breadth-first Search in Digraphs. *Proc. The 14-th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science*, 1997, pp. 33-46.
80. Frigioni D., Marchetti-Spaccamela A., Nanni U. Fully Dynamic Output Bounded Single Source Shortest Path Problem. *Proc. ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 1996.
81. Ramalingam G., Reps T. An Incremental Algorithm for a Generalization of the Shortest-Path Problem. *Journal of Algorithms*, 1996, vol. 21, pp. 267-305.
82. Villamizar C. Convergence and restoration techniques for ISP interior routing. *NANOG* [Online], 2002. Available at: <http://www.nanog.org/mtg-0206/ppt/curtis.pdf> (accessed 01 May 2015).
83. Labovitz C., Ahuja A., Bose A., Jahanian F. Delayed Internet routing convergence. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2001, vol. 9, no. 3, pp. 293-306.
84. Labovitz C., Ahuja A., Wattenhofer R., Venkatachary S. The impact of Internet policy and topology on delayed routing convergence. *Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings (INFOCOM 2001)*, IEEE, 2001, vol. 1, pp. 537-546.

Статья поступила 22 мая 2015 г.

Информация об авторе

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

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

Convergence Time of IGP Routing Protocol

Makarenko S. I.

Statement of the problem. Network communications are augment structural complexity, so ensuring the sustainability of the networks provided that the failure of individual channels and nodes becomes relevant. Review of failure statistics showed that 70% of failures in networks occurs due to deterioration of telecommunications equipment, 20% - because of incorrect maintenance operations, 17% - due to software errors. Routing protocols should ensure correct handling of failures in the network. They must do it with minimum time spent. **Purpose** – research of convergence time of the networks and estimate impact of time parameters of routing protocols, the complexity of the network topology, channel capacity and network load to convergence time of the networks. **Methods.** Author study convergence time in terms of publishing papers in this subject area. We review failure statistics and analyses of protocol insidedomain routing in the first part of the paper. The results of the analysis have shown that the best results in terms of convergence time of the network protocols based on the analysis of the channel state. In the second part of the article we have analyzed temporal parameters of the routing Protocol and the principles of operation of this Protocol which affect the convergence time of failure in the network. In the third part we have reviewed and classified the main technological solutions are used by manufacturers of telecommunications equipment to reduce the time of convergence. In the fourth part of this paper we reviewed the results of studies in the convergence time of the network for different routing protocols and different configurations time parameters. We compared the values of convergence time of the network in the simulation network in OPNET environment with the values of convergence time in experiments using telecommunication equipment. In the fifth part of the article we analyze the directions of improvement of routing protocols, in the part which refers to the reduced time of convergence, based on fresh research papers. **Innovation.** Generalized analysis of the functioning of routing protocols and the influence of temporal parameters of these protocols on the convergence time of the network are the elements of novelty. Theoretical generalization of the directions of the improvement of routing protocols, increasing the resilience of the network to failures and reducing convergence time are the elements of novelty. **The result and practical relevance.** The material of the article can be used to justify new algorithms for traffic routing in networks with failures. Routing protocols OSPF, OSPF-TE, IS-IS, IGRP, EIGRP can be improved by the analysis of perspective directions. Some solutions are discussed in the paper can be used to develop routing protocols for MANET mobile networks and networks based on Mesh technology.

Key words: routing, IGP, convergence time, the network failure, OSPF, OSPF-TE, IS-IS, IGRP, EIGRP, MANET

Information about Author

Makarenko Sergey Ivanovich – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. Тел.: +7 981 820 49 90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

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

УДК 004.72

Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha

Аганесов А. В.

Постановка задачи. Создание объединенных воздушно-космических сетей связи актуализирует вопросы решения задач маршрутизации и ретрансляции сообщений в них. При этом необходимо обеспечить заданное качество обслуживания трафика. **Целью работы** является разработка модели сети спутниковой связи, которая объединяет сети воздушной радиосвязи. При этом передача в сети спутниковой связи ведется по протоколу S-Aloha. На основе данной модели предполагается провести исследование влияния транзитного трафика из сетей воздушной радиосвязи на эффективную пропускную способность и время передачи сообщений в сети спутниковой связи. **Используемые методы.** В основу модели сети спутниковой связи положена известная модель синхронного случайного множественного доступа. **Новизна.** Элементом новизны представленной модели являются учет в качестве нагрузки отдельных сетей воздушной радиосвязи. **Практическая значимость:** представленную модель в дальнейшем предполагается использовать для обоснования возможностей по ретрансляции транзитных соединений в воздушных сетях связи. Данные результаты в дальнейшем будут использованы для математического обеспечения маршрутизаторов абонентов воздушно-космических сетей связи, построенных с использованием Mesh-технологий. Также возможна реализация на основе протокола OpenFlow для программно-конфигурируемых сетей SDN.

Ключевые слова: сеть связи, ретрансляция, маршрутизация, сеть спутниковой связи, сеть воздушной радиосвязи, S-Aloha.

Актуальность

В настоящее время в соответствии с перспективной концепцией построения систем связи специального назначения предполагается переход к много эшелонированному принципу построения объединенных систем связи Вооруженных сил (ВС). При этом при построении систем связи предполагается в максимальной степени задействовать коммерческие и открытые стандарты и протоколы.

Как показал анализ современных технологических решений по построению систем связи [1-8] в основу наземных полевых систем связи, а также воздушных сетей радиосвязи будут положены радиосети, реализованные на основе протоколов случайного множественного доступа и объединяемые в единое информационное пространство за счет абонентов, находящихся в зоне действия смежных радиосетей (рис. 1).

Ретрансляция сообщений между отдельными сетями, потребует создания новых технологических решений по обеспечению ретрансляции информационных потоков, и как следствие увеличит информационную нагрузку на сети за счет транзитного трафика. Для обеспечения заданного качества обслуживания пользовательского трафика в объединенной сети связи требуется выработать единые протоколы ретрансляции информационных потоков с учетом дополнительной нагрузки создаваемой транзитными соединениями. Данная задача особенно актуальна для сетей воздушной радиосвязи (СВРС) в УКВ диапазоне, стыкуемых через сети спутниковой связи

(ССС). Актуальность обусловлена тем, что именно на СВРС, в условиях проведения военной операции, планируется возложить информационное обеспечение авиации и ретрансляцию информационных потоков от подразделений сухопутных войск, и от развертываемых в районе операции разведывательных сетей на основе БПЛА. Кроме того, как показано в работах [9-14], СВРС доступны наземным и авиационным средствам радиоэлектронного подавления, что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков.

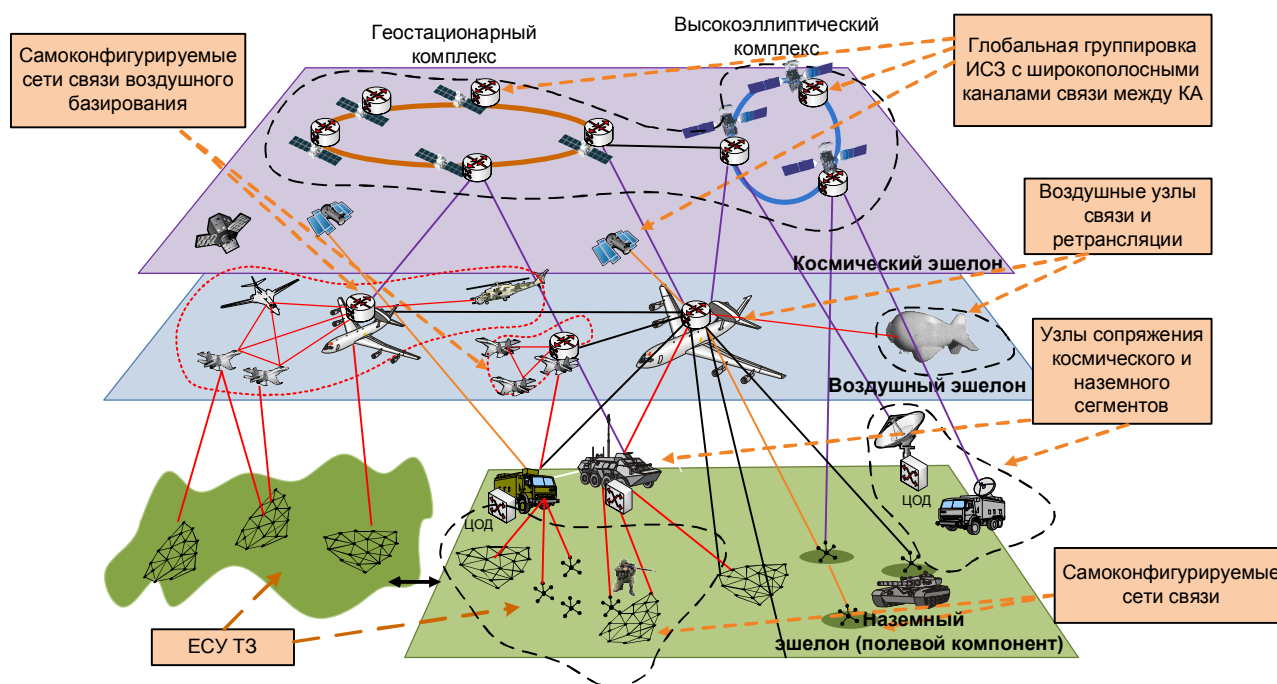


Рис. 1. Общая схема взаимодействия наземного полевого, воздушного и космического эшелонов объединенной системы связи для ВС РФ

Анализ современных и перспективных технических решений на основе работ [6, 7, 15, 16, 17, 72, 73, 75, 76] показал, что в основу воздушного эшелона будут положены системы обмена данными (СОД) в интересах которых, за счет перспективных средств и комплексов связи, будут развернуты отдельные СВРС обеспечивающие высокоскоростной цифровой информационный обмен. СОД будут обладать высокой совместимостью с наземными средствами радиосвязи и обеспечивать бесшовную ретрансляцию информационных потоков. В таблице 1 приведены основные характеристики существующих и разрабатываемых систем обмена данными по материалам из [15]. В настоящее время получила широкое применение СОД на базе ТКС-2 (ТКС-2М), однако наибольшей эффективностью обладает система ОСНОД, которая в настоящее время планируется к использованию в перспективных СВРС.

Технической основой перспективных СОД воздушного эшелона станет, комплекс связи С-111, который не только обеспечит летательные аппараты (ЛА) фронтовой, истребительной и армейской авиации высокоскоростной цифровой связью, но и будет использоваться совместно с наземными подразделениями

сухопутных войск. Для этого в радиостанциях комплекса связи предусмотрен режим помехозащищенной связи ППРЧ-Б.

Таблица 1 – Характеристики систем обмена данными

№	Характеристики	ТКС-2 (ТКС-2М)	ОСНОД
1	Назначение	Типовой комплекс связи для обмена телекодовой информацией	Объединенная система связи, обмена данными, навигации и опознавания
2	Виды сетей обмена данных	СОД между самолетами, между ПУ и самолетами	Сеть обмена всеми видами информации между АК, между АК и ПУ, между ПУ
3	Возможность закрытия	Есть	Есть
4	Количество абонентов	20	1800
5	Объем сообщения, бит	1024	1024, 2048
6	Возможность автоматической ретрансляции сообщений	Есть	Есть
7	Диапазон частот	ДКМВ, МВ-ДМВ	ДМВ

* ТКС-2М отличается от ТКС-2 циклограммой работы и составом передаваемой информации.

Таблица 2 – Некоторые ТТХ перспективного комплекса связи

№	Характеристика	Значение
1	Скорости передачи данных, кбит/с: - ДКМВ - МВ-ДМВ - ОСНОД (эффект.) - СМВ - спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	до 2,4 до 16 до 40 (100) до 34 400 до 2,4 (до 2048)
2	Количество одновременно обслуживаемых сетей	до 38
4	Направлений связи: - ДКМВ - МВ-ДМВ - ОСНОД (эффект.) - СМВ - спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	1 2 1 1 1
5	Дальность связи, км: - в направлении «земля-борт» для ДКМВ - в направлении «земля-борт» для МВ-ДМВ, ОСНОД - в направлении «борт-борт» для МВ-ДМВ, ОСНОД	1500 350 500

ТТХ комплекса связи С-111, значимые для решения задач ретрансляции информационных потоков представлены в таблице 2 по данным работ [7, 15, 18]. Как показывает анализ данных таблицы 2, в состав комплекса авиационной связи включена станция спутниковой связи, которая позволит организовать сопряжение СОД через ССС. Концепцией построения систем связи специального назначения предполагается, что ССС будет использовать режим

коммутации пакетов с их обработкой на борту [19, 20]. При этом спутники-ретрансляторы (СР) будут использоваться для иерархического «роуминга» информационных потоков, передающихся между различными воздушными и наземными полевыми радиосетями, имеющих различную войсковую и ведомственную принадлежность или не имеющих прямой электромагнитной доступности, но оснащенные средствами спутниковой связи «Багет-К», «Ливень», «Легенда» и др. со скоростями до 2,4 кбит/с (а при переходе к ЕССС-3 – до 2 Мбит/с) [7]. При этом в составе ССС для организации такого «роуминга» предполагается использовать каналы и частотные диапазоны, отводимые под функционирование подвижных ССС, а организацию доступа абонентов воздушных и наземных полевых сетей к СР производить по протоколу случайного множественного доступа S-Aloha.

Информационный обмен внутри СВРС и ССС будет вестись с помощью универсальных кодограмм – УКВС, которые в зависимости от длины сообщения состоят из 1-го, 2-ух, 3-ех или 4-ех блоков по 256 бит в каждом блоке, то есть составляют сообщения объемом 256, 512, 768 и 1024 бит. При этом на максимальное время доставки УКВС накладываются ограничения, связанные с режимом реального времени управления авиацией и необходимостью передачи информационного трафика критичного к задержкам (речь, видео). Несмотря на то, что существующие стандарты передачи информационных сообщений военного управления определяют граничные значения времени доведения в несколько секунд, к сообщениям голосового управления, а также к трафику фото и видео данных, поступающих от разведывательных средств на БПЛА в режиме реального времени, предъявляются гораздо более жесткие требования, обусловленные используемым кодеком информации (таблицы 3, 4) [21, 22, 70].

Вышеуказанные факторы определяют актуальность разработки технологических способов ретрансляции трафика СВРС через ССС, как составной части более общей задачи, а именно: разработки научно-методического аппарата решения задачи маршрутизации в воздушно-космических сетях связи с заданным качеством обслуживания.

Таблица 3 - Допустимые значения параметров качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика [21, 22]

Тип сервиса	Параметры качества обслуживания				
	Время установления соединения, с	Вероятность разрыва соединения	Задержка, мс	Джиттер, мс	Вероятность потери данных
IP-телефония	0,5-1	10^{-3}	25-500	100-150	10^{-3}
Видеоконференция	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Цифровое видео по запросу	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Передача данных	0,5-1	10^{-6}	50-1000	-	10^{-6}
Телевизионное вещание	0,5-1	10^{-8}	1000	-	10^{-8}

Таблица 4 - Требования к качеству услуг,
предоставляемых мультисервисными сетями связи [21, 22]

Тип дан-ных	Название услуги	Требуемая скорость передачи	Параметры качества услуги		
			Задержка, мс	Джит-тер	Поте-ри, %
Аудио	Телефония	4-64 кбит/ с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)	<1 мс	<3%
	Передача голоса	4-32 кбит /с	<1 с (для воспроизведения); <2 с (для записи)	<1 мс	<3%
	Звуковое вещание	16-128 кбит/ с	<10 с	<<1 мс	<1%
Видео	Видео-конференция	>384 кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)		<1%
Данные	Просмотр WEB-страниц	≈10 кБ	<2 с/стр. (отличное QoS); <4 с/стр. (допустимое QoS)	-	0
	Передача файлов	10 кБ – 10 МБ	<15с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	-	0
	Передача изображений	100 кБ	<15с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	-	0
	Доступ к электронной почте	<10 кБ	<2 с (отличное QoS); <4 с (допустимое QoS)	-	0
	Факс	≈10 кБ	<30с/ стр.	-	< 10 ⁻⁶ BER

Анализ вариантов технологических решений по сопряжению отдельных сетей воздушной радиосвязи через сеть спутниковой связи

В настоящее время СВРС могут быть сопряжены через ССС за счет использования средств спутниковой связи «Багет-К», «4РТ-С», «Кулон-В» (таблица 5) [7].

Станция «Кулон-В» является первой самолетной станцией с пропускной способностью до десяти помехозащищенных каналов. Выполняет функции малоканальной или микроузловой земной станции (ЗС) космической связи, работающей в оперативно-тактических специальных сетях связи. Применяемые в станции антенные синфазные решетки позволяют существенно улучшить аэродинамику самолета по сравнению с использованием параболической антенны. Станция позволяет организовать круглосуточную непрерывную связь на всей территории Северного полушария Земли [7].

Станция «Багет-К» предназначена для обеспечения в режиме реального времени самолетов ВВС и ВМФ дальней помехозащищенной засекреченной телефонной и телекодовой радиосвязью с наземными и корабельными пунктами управления через СР на стационарных и эллиптических орбитах Единой системы спутниковой связи. Устанавливается на самолетах типа Ту-160 [7].

Станция «4РТ-С» обеспечивает прием и передачу телекодовой и телеграфной информации в через СР на высокой эллиптической орбите Единой системы спутниковой связи [7].

Таблица 5 - Некоторые ТТХ авиационных средств спутниковой связи [7]

	Кулон-В	Багет-К	4РТ-С
Диапазон частот, ГГц	4/6	0,3/0,4	4/6
Дальность связи, км	до 17 000	до 17 000	до 17 000
Количество каналов связи:			
- телефонные	8×1,2 кбит/с	2×1,2 кбит/с	-
- телеграфные	6×0,25 кбит/с	2×0,25 кбит/с	-

Средство спутниковой связи «Кулон-В» в рамках ЕССС-2 способно организовывать каналы до 2,4-9,6 кбит/с, однако при переходе на ЕССС-3 планируется увеличить скорости мобильных авиационных абонентов до 2 Мбит/с. Это позволит организовать полноценную маршрутизацию информационных потоков отдельных СВРС через ССС. Рассмотрим современные подходы к организации маршрутизации и ее особенности, применительно к ССС.

При решении задач маршрутизации в ССС помимо стандартных показателей качества каналов связи необходимо учитывать дополнительные особенности, которые существенно усложняют процедуры маршрутизации, разработанные для наземных сетей. Эти особенности связаны со способами излучения, распространения и приема радиосигналов, а также небольшим временем «жизни» топологии каналов связи негеостационарных ССС, особенно низкоорбитальных сетей вследствие высокой скорости движения СР (под временем «жизни» топологии понимается интервал времени сохранения неизменной топологии сети связи). В зависимости от целевого назначения ССС на СР, при межспутниковой ретрансляции могут использоваться ненаправленные, слабо- или высоконаправленные антенные системы. Излученный ретранслятором радиосигнал при использовании ненаправленных или слабонаправленных антенн может поступить на входы приемников нескольких СР-соседей, которые находятся в зоне радиовидимости данного ретранслятора (широковещательный характер радиоканалов - это, пожалуй, одно из главных отличий от наземных систем связи в контексте маршрутизации). Зона радиовидимости ретрансляторов определяется направленными свойствами бортовых приемо-передающих антенно-фидерных систем, мощностью передатчиков, диапазоном используемых частот, высотой орбит и др. Например, при малой высоте орбит из-за кривизны поверхности Земли зона радиовидимости меньше, чем при большей высоте орбит. Так, при высоте орбит от 800 до 1400 км время «жизни» топологии составляет примерно от трех до десяти минут [23].

В перспективных проектах, рассматриваются интегрированные сети связи, которые представляют собой объединение спутниковых и наземных сетей связи [29]. Спутниковый сегмент представляет собой объединенную сеть геостационарных, высокоэллиптических, средне- или низкоорбитальных сетей спутников-ретрансляторов. Возможные маршруты информационных потоков в таких системах включают в себя [23, 77-80]:

- межспутниковые каналы связи (между низкоорбитальными спутниками, между низко- и высокоорбитальными ретрансляторами, между высокоорбитальными ретрансляторами),
- каналы связи СР - земная станция,
- каналы связи наземных сетей.

Очевидно, что алгоритмы маршрутизации, которые должны использоваться в различных сегментах этих сетей, будут различными. С целью упрощения программно-аппаратных средств, в таких интегрированных сетях целесообразно использовать одну универсальную схему выбора маршрута. В этом случае во всех сегментах сети будут измеряться и рассчитываться одни и те же показатели, на базе которых и определяются оптимальные в выбранной метрике маршруты. Однако в настоящее время различные сегменты интегрированных сетей проектируются и изготавливаются различными производителями, что, с учетом указанных выше особенностей маршрутизации в ССС, придает задаче маршрутизации в интегрированных наземно-космических сетях связи особую актуальность.

Изменения топологии и характеристик трафика в ССС хотя и носят высокодинамичный характер, но в большей своей части являются предсказуемыми. В частности [23, 77-80]:

- зоны радиовидимости и топология орбитальной сети связи вполне детерминированы, так как ретрансляторы движутся по орбитам с постоянными и практически неизменными баллистическими параметрами. Поэтому местоположение СР и зон радиовидимости с другими ретрансляторами орбитальной группировки может быть рассчитана заранее;
- орбитальные группировки для ССС коммерческого применения, как правило, в пространстве представляют собой регулярную структуру. Например, ССС Iridium представляет собой развертку цилиндра с детерминированной решетчатой структурой;
- моменты появления трафика в линиях связи «вверх» для каждого СР вполне предсказуемы, так как заранее известны моменты появления каждого СР над каждым географическим районом Земли;
- над полюсами в орбитальной группировке ССС возникают большие скопления (пучности) ретрансляторов. В этом случае в зоне радиовидимости каждого СР может находиться более десятка ретрансляторов других орбит и др.

Учет всех этих особенностей позволяет существенно снизить сложность решения задачи маршрутизации и разработать в достаточной степени эффективные алгоритмы маршрутизации в ССС [23-25, 28, 23, 77-80].

В настоящее время разработаны два базовых алгоритма маршрутизации учитывающие особенности изменения топологии ССС [23]:

- DT-DVTR (Discrete Time Dynamic Virtual Topology Routing);
- VN (Virtual Node).

Алгоритм DT-DVTR основывается на периодичности и регулярности изменений топологии орбитальной группировки. Длительность одного витка вокруг Земли для каждого космического аппарата (КА) разбивается на интервалы стационарности, на которых топология ССС неизменна. На каждом интервале задача маршрутизации решается одним из известных методов с разработкой соответствующих таблиц маршрутизации, набор которых для всех возможных интервалов стационарности хранится на борту каждого КА [23].

Алгоритм VN использует понятие виртуальной топологии ССС, которая представляет собой суперпозицию виртуальных узлов и физической (реальной) топологии орбитальной группировки. Околоземное пространство разбито на ряд соприкасающихся областей. В течение определенного периода времени каждому виртуальному узлу сопоставлен определенный физический спутник, находящийся в одной из этих областей. Во время пребывания КА в этой области виртуальная топология ССС считается неизменной. Как только спутник покидает эту область, данному виртуальному узлу ставится в соответствие другой спутник, который входит в эту область и которому передается вся информация, необходимая для работы данного виртуального узла. Таким образом, в данном случае расчет маршрутов ведется в виртуальной топологии ССС [23].

В перспективных проектах ССС предполагается применение технологии АТМ. Для маршрутизации в них разработана АТМ-версия алгоритма DT-DVTR. В этом случае каждая пара соседних КА сгруппирована в виртуальный путь VPC (Virtual Path Connection) и бортовой процессор КА при расчете маршрутов работает, исходя из меток этого VPC [23].

Таким образом, в целом схема сопряжения СВРС через ССС будет иметь вид представленный на рис. 2.

Как показано на рисунке, ССС предоставляет отдельным СВРС услуги глобальной транспортной сети, с помощью которой они сопрягаются между собой, а также с наземной системой управления. ССС представляет собой два сегмента - СР на высокоэллиптической орбите, решающие задачи обеспечения связью в приполярных районах и СР на геостационарной орбите, обеспечивающие связью районы Земли от 60⁰ северной широты и южнее. Подключение отдельных СВРС к ССС в рамках одного ствола СР ведется с помощью протокола случайного множественного доступа S-Aloha. Информационный обмен по межспутниковым радиолиниям, а также по каналам СР-шлюзовая станция ведется по стандарту DVB-S/S2.

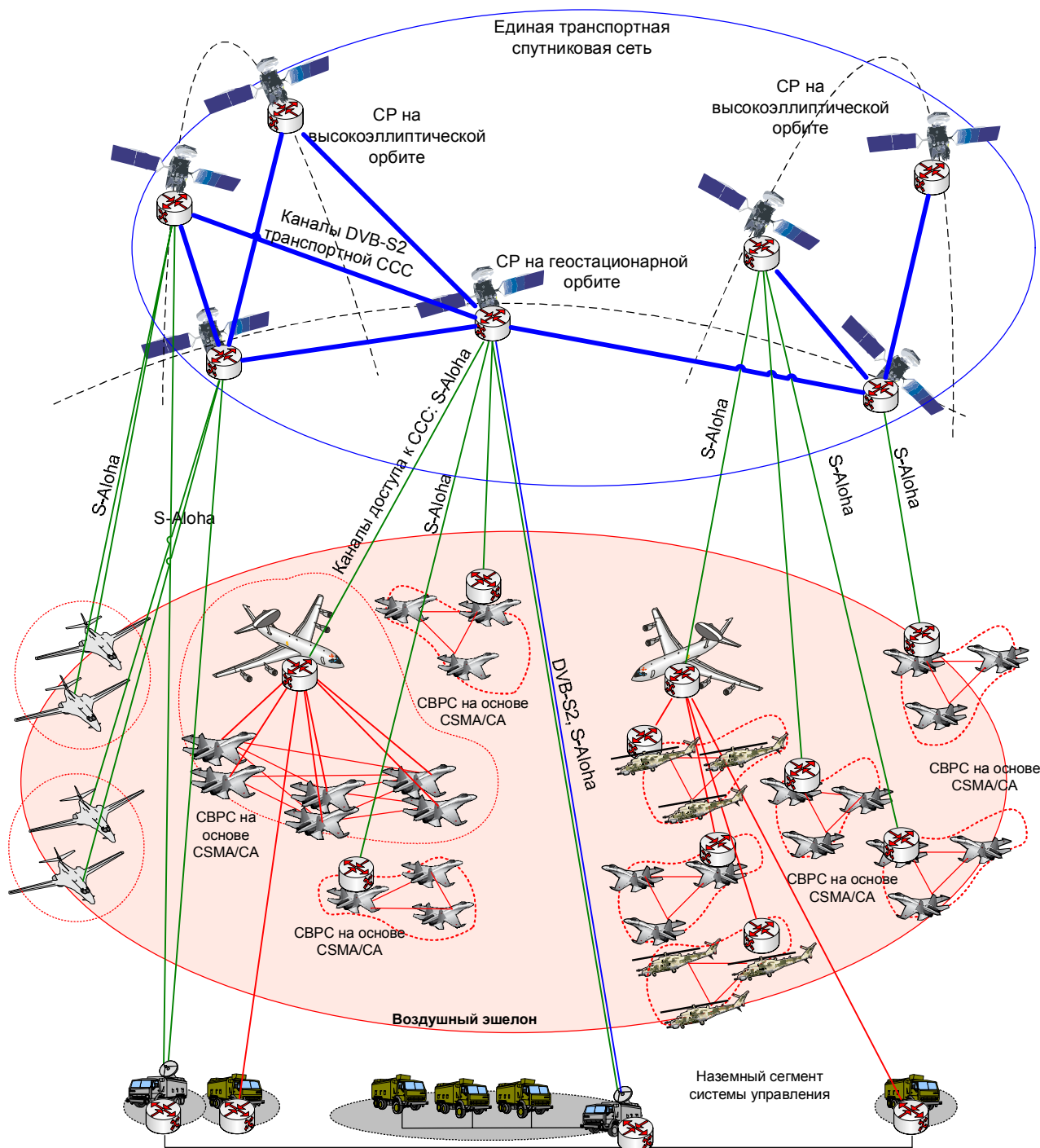


Рис. 2. Схема сопряжения СВРС через CCC

Анализ ранее проведенных исследований в области ретрансляции информационных потоков в СВРС через CCC

Вопросы совершенствования системы связи для управления авиацией являются актуальными. Проблематике совершенствования систем связи управления авиацией посвящены работы: Федосова Е.А. [15], Киткаева С.В. [34], Коновалова О.А., Буслаева А.И., Маликова С.В. [8], Войткевича К.Л. [68-76], Сулима А.А. [70, 72], Белоусова Е.А. [73, 74, 75].

В открытой литературе вопросы организации СВРС и управления ее ресурсами в интересах информационного обеспечения действий авиации исследовались в работах: Дмитриева А.Н. [30, 31, 35-37], Мотина О.В. [30, 31,

38], Максимова А.В. [30, 31, 37], Блакитного О.А. [35], Макаренко С.И. [11, 40-42], Гимбицкого В.А. [43-48], Сныткина И.И. [43, 44, 45], Калинина В.И. [49, 50, 51], Гоцуцова С.Ю. [52], Калимулиной Э.Ю. [53], Морозова А.Н. [54], Прохорова А.В. [55, 56, 57], Колядова Д.В. [55, 56], Бондаря Д.С. [57], Войткевича К.Л. [68-76], Сулима А.А. [70, 72], Белоусова Е.А. [73, 74, 75], Брянцева В.Ф. [73, 74, 75], Кейстовича А.В. [73, 75], Сайфетдинова Х.И. [73, 74, 75].

В работах Гоцуцова С.Ю. [52] Калимулиной Э.Ю. [53] и Морозова А.Н. [54] рассматривались различные аспекты маршрутизации трафика управления воздушным движением (УВД) в СВРС на основе гражданских средств связи, с учетом фактора надежности каналов. В работах Прохорова А.В. [55, 56, 57], Колядова Д.В. [55, 56], Бондаря Д.С. [57] рассмотрены вопросы обслуживания трафика критичного к задержкам в СВРС УВД. Однако данные работы в основном касались принципов УВД гражданской авиации и не учитывали особенностей управления боевой авиацией. В частности в данных работах не учитывались возможности быстрого возрастания объема передаваемых данных при дополнительном информационном обеспечении АК, на этапах атаки цели и ведении воздушного боя, не учитывались возможности организации сопряжения отдельных СВРС через ССС.

Наиболее фундаментальным исследованием в области маршрутизации и ретрансляции трафика в авиационных СВРС является диссертационная работа Войткевича К.Л. [68]. В данной работе фактически описаны основополагающие подходы к ретрансляции трафика в СВРС управления авиацией, рассмотрена применимость различных алгоритмов поиска путей в интересах задачи маршрутизации и ретрансляции трафика в объединенных наземно-воздушных сетях. Основные направления совершенствования СВРС представленные в работе [68] в дальнейшем получили развитие в работах: Алехина С.В. [69], Сулима А.А. [70, 72], Зац П.А. [70], Белоусова Е.А. [73, 74, 75], Брянцева В.Ф. [73, 74, 75], Кейстовича А.В. [73, 75], Сайфетдинова Х.И. [73, 74, 75]. В них были рассмотрены различные аспекты повышения эффективности ретрансляции информационных потоков в СВРС, а также вопросы совершенствования оборудования авиационной связи гражданского и двойного назначения, в том числе за счет создания программно конфигурируемых сетей и радиостанций.

Особенности построения СВРС для управления именно боевой авиацией рассмотрены в работах: Дмитриева А.Н. [30, 31, 35, 36, 37], Мотина О.В. [30, 31, 38], Максимова А.В. [30, 31, 35, 37], Блакитного О.А. [35], Макаренко С.И. [33, 40-42], Гимбицкого В.А. [43-48], Сныткина И.И. [43-45]. В частности, в работах Дмитриева А.Н., Мотина О.В., Максимова А.В., Блакитного О.А. [30, 31, 35-38] рассмотрены вопросы оценки организации СВРС на основе различных АМСД, а также эффективности информационного обмена в них. В работах Гимбицкого В.А. и Сныткина И.И. [43-48] рассмотрены вопросы построения эффективной системы связи управления авиацией региона на основе иерархических СВРС, а также порядок ретрансляции информационных потоков в них, при управлении массированными действиями разнородной

группировки авиации. В работах Макаренко С.И. [33, 40-42] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС для достижения заданной пропускной способности, в интересах информационного обеспечения истребительной авиации.

В работах Скороварова А.С. [59], Борисова В.И., Зинчука В.М., Лимарева А.Е. [14], Семисошенко М.А. [60], Макаренко С.И. [13, 61, 62], Иванова М.С., Попова С.А. [13], Владимирова В.И. [63], Бабусенко С. И. [64, 65] рассмотрены различные аспекты обеспечения помехозащиты СВРС и их функционирования в условиях преднамеренных помех.

В работах Калинина В.И. [49-51], Шорина О.А. [58] рассматриваются особенности управления ресурсами СВРС при обеспечения заданного качества обслуживания для высокомобильных абонентов.

Вместе с тем, в вышеуказанных работах [13, 59-65] не рассматриваются возможности ретрансляции части информационного трафика через ССС, а также не учитываются возможности ретрансляции транзитных потоков через СВРС. В работах по помехозащищенности СВРС Скороварова А.С., Борисова В.И., Зинчука В.М., Лимарева А.Е., Семисошенко М.А., Макаренко С.И., Иванова М.С., Попова С.А. [13, 14, 59, 60] рассматриваются только параметры физического уровня, не рассматриваются эффекты от снижения пропускной способности СВРС как результата воздействия преднамеренных помех. В работах Владимирова В.И., Бабусенко С. И., Макаренко С.И., [9-12, 63-65] подробно рассмотрены эффекты от воздействия преднамеренных помех на сетевом уровне и их влияние на ретрансляцию информационных потоков, но при этом в показателях СВРС не учитывалась связность сети СВРС, а также дополнительная транзитная нагрузка.

Различные аспекты построения сетевых информационных систем на основе ССС представлены в работах Камнева В. Е., Черкасова В. В., Чечина Г. В. [23], Мальцева Г.Н. [25], Ададунова С.Е., Пастухова А.С. [26, 27], Дарнопых В.В. [28]. Однако в данных работах не рассматривались особенности построения многоуровневых систем связи с использованием ССС, а также вопросы ретрансляции трафика в подобных системах. Имеются работы Аболица А.И. [29], Chen C. [77, 78], Ekici E. [77, 78, 80], Akyildiz I.F. [78, 80], Durresi A., Dash D., Anderson B. L., Kannan R., Kota S., Jain R. [79], Цветкова К.Ю., Радионова А.В., Акмолова А.Ф. [81-84] в которых рассматривается построение сложных многоуровневых систем связи на основе ССС. Как правило, основой таких сложных систем является объединение орбитальных группировок СР на различных высотах и их комплексирование с наземными сетями связи. Вопросы маршрутизации и ретрансляции трафика в таких сложных многоуровневых системах исследовались в работах Chen C. [77, 78], Ekici E. [77, 78, 80], Akyildiz I.F. [78, 80], Durresi A., Dash D., Anderson B. L., Kannan R., Kota S., Jain R. [79], Цветкова К.Ю., Радионова А.В., Акмолова А.Ф. [81-84]. Однако в этих работах по маршрутизации информационного трафика в многоуровневых системах связи на основе ССС [23-29] не учитывается нестационарность информационного трафика в СВРС военного назначения, высокая динамическая реконфигурация авиационных

сетей [39], а также возможности ретрансляции части транзитных потоков отдельных СВРС через смежные сети воздушного эшелона.

Таким образом, новизной данной работы является решение задачи моделирования процесса ретрансляции потоков СВРС через ССС, а также учет воздействия преднамеренных помех на ССС через снижение пропускной способности канала S-Aloha в соответствии с методикой [66].

Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha

Модель «Синхронная ALOHA» предложенная в работе [32] используется для описания абонентского канала доступа СВРС в магистральную ССС по протоколу S-Aloha.

Алгоритм работы абонента ССС в модели представляет собой следующую последовательность действий:

- 1) если канал свободен, то абонент передает пакет;
- 2) передавая пакет, абонент прослушивает канал, если произошло наложение передачи на передачу другим абонентом, то передача откладывается, если при передаче пакета наложения не произошло, то пакет считается успешно переданным;
- 3) если канал занят, то абонент откладывает свою передачу на более позднее время, в соответствии с распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, абонент вновь проверяет канал и повторяет описанный алгоритм.

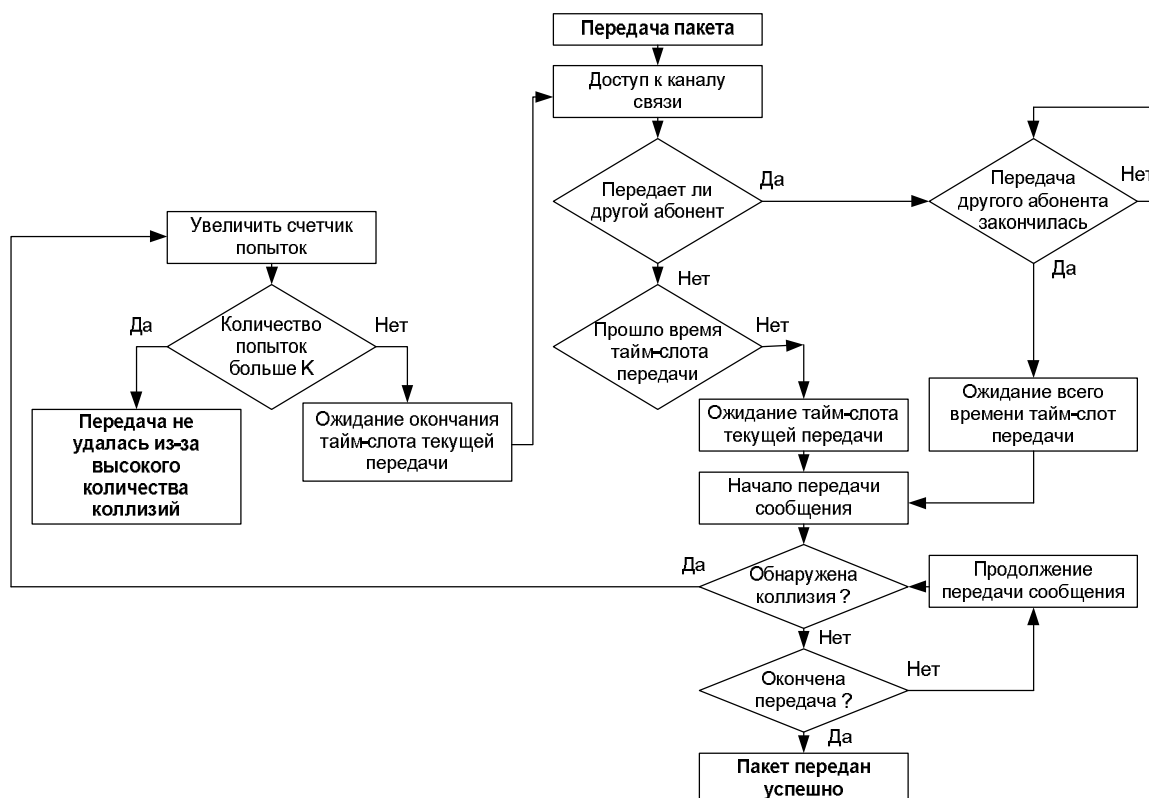


Рис. 3. Общий алгоритм функционирования алгоритма S-Aloha

Исходными данными для построения модели являются:

M – количество СВРС (абонентов ССС) совместно использующих спутниковый канал.

P_{win} – длина пакета выраженное через время передачи пакета (длина окна).

S_m – вероятность, что передача m -го абонента прошла успешно, нормированное к длине окна.

G_m – вероятность, что m -ый абонент передает пакет в каком либо окне.

Ограничения модели: рассматриваемая модель действительна при наличии большого числа равномерно «слабых» абонентов. Результаты модели получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

Доля трафика m -ого абонента ведущего успешную передачу равна вероятности того, что когда он передавал - другие абоненты не передавали. Для абонентов совместно использующих спутниковый канал будет действительна система уравнений, определяющая наборы скоростей источников, которые канал может обслужить:

$$S_m = G_m \prod_{i \neq m} (1 - G_i), m = 1..M. \quad (1)$$

Обозначим:

$$g = \prod_{i=1}^M (1 - G_i), \quad (2)$$

тогда:

$$\prod_{i \neq m} (1 - G_i) = \frac{g}{1 - G_m}. \quad (3)$$

В этом случае систему уравнений (1) можно записать в виде:

$$S_m = \frac{G_m}{1 - G_m} g, \text{ для всех } m = 1..M. \quad (4)$$

Отметим необходимое условие достижения максимальной скорости передачи для системы «Синхронная АЛОНА»:

$$G = \sum_{m=1}^M G_m = 1 \quad (5)$$

где G – средний трафик в канале определяемый как число попыток передач пакетов за время окна P_{win} . Несмотря на то, что G_m представляет собой вероятность передачи пакета, сумма G может превышать 1, в силу независимости порождения пакетов абонентами ССС. По сути, параметр G представляет собой предлагаемый к передачи трафик от всех абонентов ССС, выраженный в пакетах и нормированный к длине окна.

Введем переменные:

$$S = \sum_{m=1}^M S_m \text{ – среднее количество успешных передач на окно, приходящих}$$

на всех абонентов.

R – число окон, которые можно вложить в одно время распространения до СР и обратно.

K – количество окон, в течение которых пользователь пытается передать пакет, если первая передача завершилась наложением пакета.

$1/K$ – вероятность выбора окна для повторной передачи.

T – среднее время, за которое пакет будет успешно принят, выраженная в числе окон.

S/G – вероятность успешной передачи.

G/S – среднее число необходимых попыток передач пакета, пока не произойдет его успешная передача.

q – вероятность того, что новый пакет успешно передан.

q_t – вероятность того, что ранее блокированный пакет успешно передан.

Результаты будут получены при следующих предположениях: трафик в канале представляет собой независимый процесс (подтверждается результатами математического моделирования, полученными в [32]); источники образуют суммарный независимый процесс который является Пуассоновским.

Приняв во внимание влияние на канал пакетов не переданных в результате наложений и учитывая, что пакеты, испытавшие наложение, передаются в соответствии с выбранным параметром K получим [32]:

$$S = G \frac{q_t}{q_t + 1 - q},$$

где [32]:

$$q = \left(e^{\frac{G}{K}} + \frac{G}{K} e^{-G} \right)^K e^{-S} \text{ и } q_t = \left(\frac{e^{\frac{G}{K}} - e^{-G}}{1 - e^{-G}} \right) \left(e^{\frac{G}{K}} + \frac{G}{K} e^{-G} \right)^{K-1} e^{-S}. \quad (6)$$

Система (6) должна быть решена для получения явного выражения для S через G и K . Однако она не имеет явного решения. В [32] рассматриваются различные приближения для решения данной системы. Одним из них является приближение для K [32]:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{S}{G} = \lim_{K \rightarrow \infty} q = \lim_{K \rightarrow \infty} q_t = e^{-G}. \quad (7)$$

Причем путем математического моделирования доказывается [67], что уже при $K \geq 15$ можно рассматривать приближение (7).

Средняя задержка пакета T , выраженная в числе окон, определяется равенством [32]:

$$T = R + 1 + \frac{1 - q}{q_t} \left(R + 1 + \frac{K - 1}{2} \right). \quad (8)$$

Воспользовавшись формулой Литла получим значение среднего числа пакетов в системе N [32]:

$$N = ST = G \left(R + 1 + \frac{K - 1}{2} \right) + S \left(\frac{K - 1}{2} \right). \quad (9)$$

Необходимо отметить, что в [32, 67] рассматриваются условия устойчивости спутникового канала и приводятся модели управления для сохранения его устойчивости. В общем случае условие устойчивости канала

выглядит как ограничение на входную скорость, которая не должна превышать выходную скорость системы:

$$S \leq \left[S_{output} = (1-p)^n (M-n) \sigma (1-\sigma)^{M-n-1} + np(1-p)^{n-1} (1-\sigma)^{M-n} \right], \quad (10)$$

где $p=(R+(K+1)/2)^{-1}$ – вероятность передачи задолженного пакета (при равномерном распределении); n – количество абонентов имеющих пакет для передачи, и готовых его передавать; σ – вероятность порождения новых пакетов.

Однако рассмотрение управления каналом в условиях его неустойчивости выходит за рамки работы и здесь рассматриваться не будет.

Изменим изложенную выше модель для получения явных характеристик вместо вероятностных. Введем новые переменные:

D_{mes} – длина пакета в битах.

C – пропускная способность канала в бит/с.

C_e – эффективная пропускная способность канала в бит/с.

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени) в секундах.

t – время жизни пакета на момент поступления в передающий терминал, в секундах.

T_a – время задержки пакета в канале в секундах.

λ_m – интенсивность информационного потока в бит/с поступающий в m -ному абоненту ССС из его СВРС.

Получим зависимости для C_e и T_a от λ_m , C . Длина окна явным образом зависит от длины сообщения и пропускной способности канала:

$$P_{win} = \frac{D_{mes}}{C}. \quad (11)$$

Интенсивность поступления пакетов в терминал эквивалентна количеству порождаемых этим терминалом пакетов, длиной D_{mes} бит, за время длительности окна. То есть:

$$G_m = \frac{\lambda_m P_{win}}{D_{mes}},$$

откуда следует:

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{D_{mes}}{C / D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (12)$$

Эффективная пропускная способность канала определяется как количество успешных передач сообщений длиной D_{mes} бит, за время P_{win} и равно:

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes} / C} = SC. \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в (6) получим выражение для определения среднего количества успешных передач на окно. Учитывая, что S – нормированная величина и выражая скорость канала через C_e (13) получим:

$$C_e = SC = CG \frac{q_t}{q_t + 1 - q} = C \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (14)$$

Отметим, что для систем реального времени накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета по сети - T_m . Для данной модели K является варьируемым параметром, однако необходимо наложение условия, при котором передача заявки имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимого порога T_m передача заявки теряет смысл. Поэтому на K накладывается ограничение:

$$K \leq \frac{T_m - t}{P_{win}},$$

подставляя (11) получим:

$$K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}}. \quad (15)$$

Получим систему уравнений, определенных для всех K , для которых выполняется (15):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \sum_{m=1}^M \lambda_m \\ q = \left(e^{-\frac{1}{KC} \sum_{m=1}^M \lambda_m} + \frac{\sum_{m=1}^M \lambda_m}{KC} e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \right)^K e^{-\frac{C_e}{C}} \\ q_t = \left(\frac{e^{-\frac{1}{KC} \sum_{m=1}^M \lambda_m} - e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}}{1 - e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}} \right) \left(e^{-\frac{1}{KC} \sum_{m=1}^M \lambda_m} + \frac{\sum_{m=1}^M \lambda_m}{KC} e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \right)^{K-1} e^{-\frac{C_e}{C}} \end{array} \right. \quad (16)$$

Учитывая приближение (7) можно упростить выражение для C_e :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \left(\sum_{m=1}^M \lambda_m \right) \\ 15 \leq K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}} \end{array} \right. \quad (17)$$

Однако приближение (7) не учитывает влияние параметра K в явном виде, и как следствие выражение (17) не зависит от K . В [8] предложено приближение, явно учитывающее данный параметр:

$$q_t \approx \frac{K-1}{K} e^{-G}, \quad (18)$$

В этом случае из (6) и (7), для q , получим:

$$S = G \frac{(K-1)e^{-G}}{2K-1+Ke^{-G}}. \quad (19)$$

Окончательно имеем систему 3-ех уравнений, которая определена при условии (15):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = \frac{(K-1)e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)}}{K - e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)}} \left(\sum_{m=1}^M \lambda_m \right) \\ q = e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)} \\ q_t = \frac{K-1}{K} e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)} \end{array} \right. \quad (20)$$

Математическое моделирование подтвердило [32] факт сходимости результатов для $S(G, K)$ для $K \geq 15$.

Определим задержку сообщений при передаче T . Так как T зависит от R (см. (8)), определим R через характеристики канала:

$$R = \frac{2d_{\text{сot}}/c}{P_{\text{win}}} = \frac{2d_{\text{сot}}C}{cD_{\text{mes}}}, \quad (21)$$

где $c = 300\,000$ км/с – скорость распространения электромагнитных волн; $d_{\text{сot}}$ – дальность от терминала до спутника в километрах. (В работе [32] используется приближение: дальность от терминала до спутника равна высоте полета спутникового ретранслятора, что для летательных аппаратов с большой высотой полета, особенно при нахождении спутника у линии горизонта приводит к существенным погрешностям вычислений).

Тогда задержка, выраженная в секундах, будет равна (из формулы (8)):

$$T_a = \frac{D_{\text{mes}}}{C} \left(\frac{2d_{\text{сot}}C}{cD_{\text{mes}}} + 1 + \frac{K \left(1 - e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)} \right)}{\left(K - 1 \right) e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)}} \left(\frac{2d_{\text{сot}}C}{cD_{\text{mes}}} + \frac{K-1}{2} + 1 \right) \right). \quad (22)$$

Параметр K определяется условием (15), а q и q_t можно получить из (20). Отметим, что спутниковый канал не нуждается в обратных квитанциях о правильном приеме сообщения, так как терминал может сам прослушать свою передачу спустя время R , и сделать вывод о ее успешности.

Выводы

Таким образом, получены количественные характеристики качества обслуживания спутникового канала трафика коммутации пакетов – T_a и C_e в зависимости не от вероятностных характеристик, а от технических характеристик канала связи и абонентов, представляющих собой отдельные СВРС. Данная модель в дальнейшем может использоваться для расчета воздушно-космических сетей связи и обоснования их структуры при использовании в качестве канала доступа к ССС канала множественного доступа на основе протокола S-Aloha.

Литература

1. Денисов Б. Б. Проблемы наращивания телекоммуникационного ресурса в интересах функционирования информационно-управляющих систем специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Под ред. Ю.В. Бородакия. М.: АО «Концерн «Системпром», 2012.
2. Кобозев Ю. Н. Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. С. 7-9.
3. Шептура В. Н. Архитектура перспективной системы связи группировки войск (сил) для обеспечения управления адаптивными действиями войск (сил) [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. С. 16-20.
4. Легков К. Е., Лебякин И. А. Основные подходы к предоставлению услуг в инфокоммуникационных системах специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Бородакия Ю.В. М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. С. 38-41.
5. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России - 2012 / По ред. Тюркина М.Л., Шадаева М.И., Аджемова А.С., Иванова И.П., Дворянкина С.В., Куц А.В., Квитко А.В., Важева П.А., Быстрова Ю.А. М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. 156 с. URL: www.informost.ru (дата доступа 03.05.2015).
6. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / Под ред. Абрамовича А.В., Герасимова А.В., Цибина С.В., Ометова К.С., Быстрова Ю.А. М.: ООО «Компания

«Информационный мост», 2013. 216 с. URL: www.informost.ru (дата доступа 03.05.2015).

7. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. Иванова С. М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. 695 с.

8. Коновалов О. А., Буслаев А. И., Маликов С. В. Актуальные направления развития перспективной системы связи вооруженных сил // III научные чтения имени А.С. Попова. Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией: сб. ст. по материалам Всероссийской НТК слушателей, курсантов и молодых ученых, посвященной 95-летию со Дня образования войск связи (10 октября 2014 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. С. 42-44.

9. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. №7 (59). С. 956-961.

10. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на функционирование расширенного протокола маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP) // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. №2 (61). С. 223-229.

11. Макаренко С. И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления, 2010, №6 (65). С. 807-815.

12. Антонович П. И., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Ушанев К. В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3(48). С. 93-101.

13. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.

14. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. Борисова В.И.; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.

15. Авиация ПВО России и научно технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / под ред. Федосова Е.А. – М.: Дрофа, 2005. – 815 с.

16. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов / под общ. ред. С. И. Макаренко. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

17. Комяков А. В., Вдовин Л. М., Кондина И. В., Кулаков Д. С. Современная отечественная авиационная аппаратура автоматического обмена данными // Электросвязь. 2010. № 6. С. 32-37.
18. Научно-производственное предприятие «Полет». Официальный сайт. [Электронный ресурс]. 2015. URL: <http://www.polyot.atnn.ru> (дата доступа 03.02.2015).
19. Телегин Г. А., Моисеев Н. И., Демидов А. С., Рязанцев О. Д., Алыбин В. Г. Спутниковые интегрированные телекоммуникационные сети на технологии АТМ // 11 Международная конференция «Микроволновые и телекоммуникационные технологии» (CriMiCo'2001). 10-14 сентября. Севастополь, 2001.
20. Кузенков А. В. Состояние и перспективы развития отечественных ретрансляторов // Аэрокосмический курьер. 2013. № 2. С. 42-45.
21. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчёта показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. - Красноярск: изд. ООО "Поликом", 2010.— 389 с.
22. Макаренко С. И., Бородинов Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. №1 (73). С. 65-79.
23. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие. — М.: «Альпина Паблишер», 2004. – 536 с.
24. Иванов В. И. Централизованный метод балансировки нагрузки в низкоорбитальной спутниковой системе // Т-Comm. 2014. № 4. С. 38-42. □
25. Мальцев Г. Н. Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 1. С. 33-39.
26. Пастухов А. С., Перегняк А. Е., Лукьянцев С. А., Симонян А. Г. Оценка взаимного влияния самоподобных Internet- и видеотрафика при передаче по гибридным сетям спутниковой связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 1. С. 58-61.
27. Пастухов А.С., Разумов Я.М., Окулов К.Ю., Гуреев А.К. Моделирование совместной передачи видео- и Internet-трафика в стандарте DVB/IP/MPEG-2 в гибридных спутниковых сетях связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. № 2. С. 56-60.
28. Дарнопых В. В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Труды Московского авиационного института. – 2004. №16.
29. Аболищ А.И., Степанов Л. А. Интеграция спутникового и наземного беспроводного широкополосного доступа // Электросвязь. 2007. № 9. С. 22-26.
30. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

31. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докл. юбилейной науч. техн. конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.
32. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер с англ. – М.: Мир. 1979. – 600 с.
33. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.
34. Киткаев С. В. Концепция технической модернизации средств авиационной электросвязи России // Электросвязь. 2009. № 5. С. 29-33.
35. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Блакитный О. А. Проблема построения единой автоматизированной системы радиосвязи региона и пути ее решения // Сб. трудов X юбилейной научно-технической конференции «Проблемы радиосвязи». – Н. Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.
36. Дмитриев А. Н., Мотин О. В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.
37. Дмитриев А. Н., Максимов А. В. Оптимизация авиационных сетей обмена данными // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.
38. Мотин О. В. Модель функционирования авиационного УКВ канала обмена данными // XXIV военно-научная конференция молодых ученых. Щелково: 30 ЦНИИ МО РФ, 2001.
39. Макаренко С.И., Рюмшин К.Ю., Михайлов Р.Л. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139-147.
40. Макаренко С. И. Особенности распределения ресурсов радио сети управления авиационными комплексами перехвата в условиях варьирования интенсивности информационного обмена // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «VIII научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского». Часть 2. – М.: изд. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2007. – С. 118.
41. Макаренко С. И. Задача адаптивного управления пропускной способностью каналов сети воздушной радиосвязи в условиях квазистационарности потоков данных // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта» - Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 25-28.
42. Макаренко С. И. Расчет параметров алгоритма адаптивного распределения пропускной способности каналов наведения в сети воздушной радиосвязи // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых

авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта» - Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 28-33.

43. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Организация управления силами и средствами авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры №100. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003.

44. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Задачи боевого управления единой системы воздушной радиосвязи в комплексе пунктов управления авиационной группировкой региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры №100. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003.

45. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Функциональная модель процесса управления авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры №100. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003.

46. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях истребительной авиации // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). 2005. № 26.

47. Гимбицкий В. А., Бакум А. Н. Совершенствования боевого управления авиацией ПВО // Тезисы докладов 18 НТК курсантов СВВАИУ. – Ставрополь: СВВАИУ, 1996.

48. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях дальней авиации и ВТА // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). 2005. № 26.

49. Калинин В. И. Методика оценки вероятности обслуживания абонентов с требуемой достоверностью в зоне обслуживания станции радиодоступа [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

50. Калинин В. И. Пространственные модели зон обслуживания систем связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

51. Калинин В. И. Потокосетевые модели в системах связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

52. Гоцуцов С. Ю. Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением на основе технологий коммутации пакетов. Дис. ... к.т.н. по спец. 05.22.13. М.: МИИГА, 2007, 211 с.

53. Калимулина Э.Ю. Разработка и исследование аналитических моделей надёжности и их применение для оптимизации территориально-распределённых сетей. Дис. ... к.т.н. по спец. 05.13.13. М.: МТУСИ, 2009. 222 с.

54. Морозов А. Н. Моделирование авиационных наземных фиксированных сетей передачи данных для организации воздушного движения в условиях дефицита исходных данных. Дис. ... к.ф.-м.н. по спец. 05.13.18. М.: МФТИ (ТУ), 211 с.

55. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Влияние явления одновременной передачи вызовов на работу систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 204. С. 82-87.

56. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Реализация перспективной системы коммутации речевой связи для управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. № 193. С. 55-58.

57. Прохоров А. В., Бондарь Д. С. Применение аппаратуры широкополосного радиодоступа в локальных сетях связи и передачи данных систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 176. С. 93-100.

58. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи. Дис. д. техн. наук по спец. 05.12.13. – М.: МТУСИ, 2005. – 351 с.

59. Скороваров А. С. Пути повышения эффективности функционирования авиационных средств обмена информацией с ППРЧ в условиях помех // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

60. Семисошенко М. А. Управление автоматизированными сетями декаметровая связи в условиях сложной радиоэлектронной обстановки – СПб.: ВАС, 1997. 364 с.

61. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2-2. - URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (дата доступа 03.02.2015).

62. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата доступа 03.02.2015).

63. Владимиров В. И. Информационные основы радиоподавления линий радиосвязи в динамике радиоэлектронного конфликта. Воронеж: ВИРЭ. 2003. – 276 с.

64. Бабусенко С. И., Исаев В. В. Статистическое моделирование многопролетных сетей пакетной радиосвязи. – Мат. 18 НТК Техника средств связи – Воронеж: НИИС, 1992.

65. Бабусенко С. И., Исаев В. В. Аналитическая модель маршрутизации в пакетной радиосети. – Мат. 18 НТК Техника средств связи – Воронеж: НИИС, 1992.

66. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. - URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (дата доступа 03.02.2015).

67. Авен О. И., Гурин Н. Н., Коган Я. А. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
68. Войткевич К. Л. Методы управления трафиком в наземно-воздушных сетях связи. Дис. ... д.т.н. по спец. 05.13.01. Н.Новгород: НПП «Полет», 1998. 375 с.
69. Алехин С.В., Войткевич К. Л. Моделирование протокола маршрутизации для беспроводных мобильных сетей // Электросвязь. 2014. № 7. С. 7-8.
70. Войткевич К.Л., Сулима А. А., Зац П. А. Проблемы построения канала управления беспилотными летательными аппаратами на основе ДКМВ-радиолинии // Электросвязь. 2014. № 7. С. 9-11.
71. Войткевич К. Л., Резвов А.В., Шанин В. Н. Специализированные локальные беспроводные мобильные сети гражданского и военного назначения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 130-133.
72. Комяков А. В., Войткевич К. Л., Сулима А. А. Инновационные решения для перспективных летательных аппаратов // Деловая слава России. 2013. № 3 (41). С. 26-27.
73. Белоусов Е. Л., Кейстович А. В., Войткевич К. Л., Брянцев В. Ф., Сайфетдинов Х. И. Современное оборудование сети авиационной электросвязи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. № 1-2. С. 70-73.
74. Белоусов Е. Л., Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Вопросы создания авиационного радиосвязного оборудования по принципу «программируемое радио» // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 11-18.
75. Белоусов Е. Л., Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Перспективное бортовое оборудование сети авиационной радиосвязи // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96). С. 11.
76. Войткевич К. Л. Опыт по созданию бортовых комплексов связи для самолетов тактического звена управления // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2009. № 1-2. С. 42-43.
77. Chen C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks // Wireless Networks. 2005. No. 11. pp. 507–521.
78. Chen C., Ekici E., Akyildiz I. F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks // // Proceedings of the 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia. – ACM, 2002. – Pp. 109-116.
79. Durresi A., Dash D., Anderson B. L., Kannan R., Kota S., Jain R. Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture // Aerospace Conference. IEEE, 2004. – Vol. 2. – С. 1086-1104.
80. Akyildiz I. F., Ekici E., Bender M. D. MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2002. Vol. 10. No. 3. pp. 411-424.

81. Цветков К. Ю., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н., Викторов Е. А., Веремчук А.С. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: алгоритм расширяющегося поиска мобильных абонентов // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2014. № 642. С. 41-48.

82. Цветков К. Ю., Радионов А. В., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н., Викторов Е. А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: баллистическое построение // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2012. № 634. С. 45-55.

83. Цветков К.Ю., Радионов А.В., Акмолов А.Ф., Ефимов С.Н., Викторов Е.А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: варианты реализации бортового коммуникационного оборудования спутника-ретранслятора // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2012. № 635. С. 5-13.

84. Цветков К.Ю., Акмолов А.Ф., Ефимов С.Н., Викторов Е.А., Веремчук А.С. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: принципы построения шлюзовых станций и аппаратуры потребителей // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2013. № 638. С. 16-24.

References

1. Denisov B. B. Problemy narashchivaniia telekommunikatsionnogo resursa v interesakh funktsionirovaniia informatsionno-upravliaiushchikh sistem spetsial'nogo naznacheniiia [The Problems of Up Capacity Telecommunication Resource in the Interests of a Functioning Management Information Systems Special Purpose]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Modern trends in the theory and practice of control systems for special purposes"). Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2012 (in Russian).

2. Kobozev Iu. N. Perspektivy razvitiia sistem sviazi i telekommunikatsii v informatsionno-upravliaiushchikh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia [Prospects for the Development of Communication and Telecommunication Systems in Management Information Systems, Special Purpose]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems), vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 7-9 (in Russian).

3. Sheptura V. N. Arkhitektura perspektivnoi sistemy svyazi gruppировки voisk (sil) dlia obespecheniia upravleniia adaptivnymi deistviiami voisk (sil) [Architecture of Advanced Communication Systems Forces to Ensure Adaptive Management Actions of the Troops]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference “Modern Trends in the Theory and Practice of Control Systems for Special Purposes”), vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 16-20 (in Russian).

4. Legkov K. E., Lediankin I. A. Osnovnye podkhody k predostavleniiu uslug v infokommunikatsionnykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia [Basic Approaches to the Provision of Services in Information and Communication Systems for Special Purposes]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* (Proceedings of All-Russian Scientific Conference “Telecommunications and Communication in Management Information Systems”), vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 38-41 (in Russian).

5. Tiurkin M. L., Shadaev M. I., Adzhemov A. S., Ivanov I. P., Dvoriankin S. V., Kuts A. V., Kvitko A. V., Vazhev P. A., Bystrov Iu. A. *Informatsionnye tekhnologii, svyaz' i zashchita informatsii v MVD Rossii* [Information Technology, Communication and Information Protection in the Ministry of Internal Affairs of Russia]. Moscow, "Company "Information Bridge", 2013, 156 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2015) (In Russian).

6. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. *Svyaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii - 2013: tematicheskii sbornik* [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation - 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2015) (in Russian).

7. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, svyazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (In Russian).

8. Konovalov O. A., Buslaev A. I., Malikov S. V. Aktual'nye napravleniia razvitiia perspektivnoi sistemy svyazi vooruzhennykh sil [Current Trends in the Development of Advanced Communication Systems of the Armed Forces]. *Proceedings of III readings behalf of the A. S. Popov, Voronezh, Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"*, 2014, pp. 42-44 (in Russian).

9. Makarenko S. I. Analiz vozdeistviia prednamerennykh pomekh na setevoi uroven' modeli vzaimodeistviia otkrytykh sistem i funktsionirovanie protokola marshrutizatsii otsenki sostoianiia kanala (OSPF) [Analysis of the Impact of Intentional Interference at the Network Level Model of Open Systems Interaction and Functioning of the Routing Protocol Assessment Channel (OSPF)]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2009, vol. 59, no. 7, pp. 956-961 (in Russian).

10. Makarenko S. I. Analiz vozdeistviia prednamerennykh pomekh na funktsionirovanie rasshirennogo protokola marshrutizatsii vnutrennego shliuza (EIGRP) [Analysis of Affecting Intended Interferences on the Operation of the Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 61, no. 2, pp. 223-229 (in Russian).

11. Makarenko S. I. Issledovanie vliianiia prednamerennykh pomekh na vozmozhnosti po retransliatsii soobshcheniia i pokazateli kachestva obsluzhivaniia kanal'nogo urovnia modeli OSI dlia sistemy sviazi so sluchainym mnozhestvennym dostupom abonentov [The Study of the Influence of Intentional Interference at the Relay Capabilities of the Message and the Quality of Service Link Layer of the OSI Reference Model for Communication Systems with Random Multiple Access Subscribers] *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 65, no. 6, pp. 807-815 (in Russian).

12. Antonovich P. I., Makarenko S. I., Mihaylov R. L., Ushanev K. V. New means of destructive effects on network centric military command, control and communication systems in the information space. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).

13. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem sviazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastoty. Monografiia* [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. St-Petersburg, Svoe Izdatel'stvo Publ., 2013, 166 p. (in Russian).

14. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosviazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty* [Interference Resistance Radio Systems with Method of the Frequency-Hopping Spread Spectrum], second edition. Moscow, RadioSoft Publ., 2008, 512 p. (in Russian).

15. Fedosov E. A. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra. Monografiia* [Air Defence of Russia and Scientific Technical Progress: Combat Systems and Systems Yesterday, Today, Tomorrow. Treatise]. Moscow, Drofav Publ., 2005, 815 p. (in Russian).

16. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy sviazi* [Radio Communications System]. Voronezh, Military Aviation Engineering University, 2011, 285 p. (in Russian).

17. Komiakov A. V., Vdovin L. M., Kondina I. V., Kulakov D. S. *Sovremennaiia otechestvennaia aviatsionnaia apparatura avtomaticheskogo obmena dannymi* [Modern Domestic Aviation Equipment for Automatic Data Exchange]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2010, vol. 6, pp. 32-37 (in Russia).

18. Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie "Polet". Available at: <http://www.polyot.atnn.ru> (accessed 03 February 2015) (in Russia).

19. Telegin G. A., Moiseev N. I., Demidov A. S., Ryazantsev O. D., Alybin V. G. *Sputnikovyie integrirovannye telekommunikatsionnye seti na tekhnologii ATM* [Satellite Integrated Telecommunication Networks Based on Atm-Technology]. *11-th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo '2001), 10-14 September, Sevastopol, 2001*.

20. Kuzenkov A. Sostoianie i perspektivy razvitiia otechestvennykh retransliatorov [The State and Prospects of Development of Domestic Repeaters]. *Aerospace courier*, 2013, vol. 2, pp. 42-45 (in Russian).

21. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelei kachestva funktsionirovaniia uzlovogo oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setei sviazi sleduiushchego pokoleniia* [Models and methods of calculation of quality performance of the nodal equipment and structural network parameters of the networks to the next generation]. Krasnoyarsk, Polikom Publ., 2010, 389 p. (in Russian).

22. Makarenko S. I., Borodinov R. V. Analiz tekhnologii obespecheniia kachestva obsluzhivaniia v mul'tiservisnykh ATM setiakh [The Analysis of Technologies to Ensure Quality of Service in Multiservice ATM Networks]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2012, vol. 73, no. 1, pp. 65-79. (in Russian).

23. Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. Sputnikovye seti sviazi [Satellite network], Moscow, Al'pina Publisher Publ., 2004, 536 p. (in Russian).

24. Ivanov V. I. Tsentralizovannyi metod balansirovki nagruzki v nizkoorbital'noi sputnikovoi sisteme [The centralized load balancing method for low earth orbit satellite system]. *T-Comm*, 2014, no 4, pp. 38-42 (in Russian).

25. Mal'tsev G. N. Setevye informatsionnye tekhnologii v sovremennykh sputnikovykh sistemakh sviazi [Network Information Technologies in Modern Satellite Communication Systems]. *Information and Control Systems*, 2007, № 1, pp. 33-39 (in Russian).

26. Pastukhov A. S., Peregniak A. E., Luk'iantsev S. A., Simonian A. G. Otsenka vzaimnogo vliianiia samopodobnykh Internet - i videotrafika pri peredache po gibridnym setiam sputnikovoi sviazi [Assessment of Interference of Self-Similar Internet and Video Traffic During Transmission Over Hybrid Networks Satellite Networks]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2009, vol. 5, № 1, pp. 58-61 (in Russian).

27. Pastukhov A. S., Razumov Ia. M., Okulov K. Iu., Gureev A. K. Modelirovanie sovmestnoi peredachi video- i Internet-trafika v standarte DVB/IP/MPEG-2 v gibridnykh sputnikovykh setiakh sviazi [Modeling joint video and Internet traffic as standard DVB/IP/MPEG-2 in hybrid satellite networks]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2007, vol. 3, № 2, pp. 56-60 (in Russian).

28. Darnopykh V. V. Planirovanie tselevogo funktsionirovaniia kosmicheskikh apparatov i sistem: zadachi, metody i algoritmy ikh resheniia [The Planning Target Functioning Spacecraft and Systems: Challenges, Methods and Algorithms of Their Solution]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 16, 2004 (in Russian).

29. Abolits A. I., Stepanov L. A. Integratsiia sputnikovogo i nazemnogo besprovodnogo shirokopolosnogo dostupa [Integration of Satellite and Terrestrial Wireless Broadband Access] *Telecommunications and Radio Engineering*, 2007, № 9, pp. 22-26 (in Russian).

30. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Otsenka effektivnosti setei vozduшной radiosvazi pri ispol'zovanii razlichnykh algoritmov mnogostantsionnogo dostupa [Evaluation of the Effectiveness of the Networks to Air Radio Communications Using Different Algorithms for Multiple Access]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

31. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Modeli setei radiosvazi, ispol'zuiushchie razlichnye algoritmy mnozhestvennogo dostupa [Model Radio Communications Networks that use Different Algorithms for Multiple Access Telecommunications]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

32. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume II – Computer Applications*. New York: Wiley Interscience. p. 576.

33. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosvazi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

34. Kitkaev S. V. Kontseptsiiia tekhnicheskoi modernizatsii sredstv aviatsionnoi elektrosvazi Rossii [The Concept of Technical Modernization of Aviation's Telecommunication Russia]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2009, no. 5, pp. 29-33 (in Russian).

35. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Blakitnyi O. A. Problema postroeniia edinoi avtomatizirovannoi sistemy radiosvazi regiona i puti ee resheniia [The Problem of Constructing a Unified Automated Communication Systems of the Region and the Ways of its Solution]. Konferentsiia “*Problemy radiosvazi*” (Proceedings of the Conference “Problems of radio communication”). Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatie «Polet», 1999 (in Russian).

36. Dmitriev A. N., Motin O. V. Model' aviatsionnogo UKV kanala obmena dannymi [Model aviation ultrashort-waves communication channel]. *Tezisy dokladov nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

37. Dmitriev A. N., Maksimov A. V. Optimizatsiia aviatsionnykh setei obmena dannymi [Optimization of aviation networks data communication]. *Sbornik trudov X nauchno tekhnicheskoi konferentsii “Problemy radiosvazi” (Proceedings of the Conference Title «Problems of radio communication»)*, Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatie “Polet”, 1999 (in Russian).

38. Motin O. V. Model' funktsionirovaniia aviatsionngo UKV kanala obmena dannymi [The Model of Functioning Aviation Ultrashort-waves Communication channel]. *XXIV voenno-nauchnaia konferentsiia molodykh uchenykh. (Proceedings of the Conference Title XXIV military-scientific conference of young scientists)*, Shchyolkovo, 30 tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii, 2001 (in Russian).

39. Makarenko S. I., Ryimshin K. Yu., Mixajlov R. L. Model' funktsionirovaniia ob"ekta seti sviazi v usloviiakh ogranichennoi nadezhnosti kanalov sviazi [Model of Functioning of Telecommunication Object in the Limited Reliability of Communication Channel Conditions]. *Information Systems and Technologies*, 2014, no. 6, pp. 139-147 (in Russian).

40. Makarenko S. I. Osobennosti raspredeleniia resursov radio seti upravleniia aviatsionnymi kompleksami perekhvata v usloviiakh var'irovaniia intensivnosti informatsionnogo obmena [Features of resource allocation radio network control aircraft interception complexes in terms of the variation of the intensity of data exchange]. *Materialy nauchno-tehnicheskoi konferentsii "VIII nauchnye chteniia po aviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo"* (Proceedings of the 8th All-Russian Scientific Conference on Aviation, Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky). Part 2, Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2007, 118 p. (in Russian).

41. Makarenko S. I. Zadacha adaptivnogo upravleniia propusknoi sposobnost'iu kanalov seti vozdushnoi radiosviazi v usloviiakh kvazistatsionarnosti potokov dannykh [The task of the adaptive bandwidth control channel network air radio in conditions of quasi-stationarity of data streams]. *Sbornik dokladov konferentsii «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* (Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of improving combat airplane, increasing the efficiency of their operation and repair"), Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 25-28 (in Russian).

42. Makarenko S. I. Raschet parametrov algoritma adaptivnogo raspredeleniia propusknoi sposobnosti kanalov navedeniia v seti vozdushnoi radiosviazi. [Calculation of parameters of the algorithm adaptive bandwidth channel capacity of guidance channel in the air network radio channel] *Sbornik dokladov iubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi shkoly-seminara «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* (Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of Improving Combat Airplane, Increasing the Efficiency of Their Operation and Repair"), Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 28-33 (in Russian).

43. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Organizatsiia upravleniia silami i sredstvami aviatsii regiona [Organization Management of Forces and Means of Air in the Region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

44. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Zadachi boevogo upravleniia edinoi sistemy vozdushnoi radiosviazi v komplekse punktov upravleniia aviatsionnoi gruppirovkoi regiona [The tasks of command and control of a unified system of air communication in the complex control of the aviation group of the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

45. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Funktsional'naia model' protsessa upravleniia aviatsii regiona [Functional model of the process control aviation in the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

46. Gimbitskii V. A. Analiz sistemy vozdushnoi radiosviazi v chastiakh istrebitel'noi aviatsii [Analysis of the air communication system in parts of fighter aircraft]. *Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii sbornik filiala Voenno-vozdushnai inzhenernai akademii imeni N. E. Zhukovskogo*, Stavropol, 2005, no. 26 (in Russian).

47. Gimbitskii V. A., Bakum A. N. Sovershenstvovaniia boevogo upravleniia aviatsiei PVO [Improvement of Command and Control Air Anti-Aircraft Defence]. *Abstracts of Papers 18 Scientific Technical Conference of Cadet of Stavropol Higher Military Aviation Engineering College*, Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 1996 (in Russian).

48. Gimbitskii V. A. Analiz sistemy vozdushnoi radiosviazi v chastiakh dal'nei aviatsii i VTA [Analysis of the air communication system in parts of long-range aviation and military transport aircraft]. *Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii sbornik filiala Voenno-vozdushnai inzhenernai akademii im. N.E. Zhukovskogo*, Stavropol, 2005, no. 26 (in Russian).

49. Kalinin V. I. Metodika otsenki veroiatnosti obsluzhivaniia abonentov s trebuemoi dostovernost'iu v zone obsluzhivaniia stantsii radiodostupa [The method of estimating the probability of customer service with the required accuracy in the service area of the radio access station]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova* (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov), 26 April 2011 (in Russian).

50. Kalinin V. I. Prostranstvennye modeli zon obsluzhivaniia sistem sviazi s podvizhnymi ob"ektami [Spatial models of service areas of communication systems with mobile objects]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova* (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov), 26 April 2011 (in Russian).

51. Kalinin V. I. Potokovye setevye modeli v sistemakh sviazi s podvizhnymi ob"ektami [Streaming network models in communication systems with mobile objects]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova* (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov), 26 April 2011 (in Russian).

52. Gotsutsov S. Iu. Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem na osnove tekhnologii kommutatsii paketov. Diss. kand. tehn. nauk [Improvement of Automated Systems of Air Traffic Control Based on the Technology of Packet Switching. Ph.D. TesisA]. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2007, 211 p. (in Russian).

53. Kalimulina E. Iu. *Razrabotka i issledovanie analiticheskikh modelei nadezhnosti i ikh primenenie dlia optimizatsii territorial'no-raspredelennykh setei. Diss. kand. tehn. nauk* [Research and development of analytical reliability models and their application to optimization of geographically distributed networks. Ph.D. Tesis], Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 2009, 222 p. (in Russian).

54. Morozov A. N. *Modelirovanie aviatsionnykh nazemnykh fiksirovannykh setei peredachi dannykh dlia organizatsii vozdushnogo dvizheniia v usloviakh defitsita iskhodnykh dannykh. Diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Modeling aviation ground fixed data networks for air traffic management in conditions of deficiency of the original data. Ph.D. Tesis]. Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology, 211 p. (in Russian).

55. Koliadov D. V., Prokhorov A. V. Vliianie iavleniia odnovremennoi peredachi vyzovov na rabotu sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem [Effect of Simultaneous Transmissions Phenomenon on Air Traffic Control Systems Functionality]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2014, no. 204, pp. 82-87 (in Russian).

56. Koliadov D. V., Prokhorov A. V. Realizatsiia perspektivnoi sistemy kommutatsii rechevoi sviazi dlia upravleniia vozdushnym dvizheniem [Implementation of Next-Generation Voice Communication System for Civil Aviation]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2013, no. 193, pp. 55-58 (in Russian).

57. Prokhorov A. V., Bondar' D. S. Primenenie apparatury shirokopolosnogo radiodostupa v lokal'nykh setiakh sviazi i peredachi dannykh sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem [Application of Means of Broadband Radio Access in Local Communication Networks and Data Transmission for Systems of Air Traffic Management]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2012, no. 176, pp. 93-100 (in Russian).

58. Shorin O. A. *Metody optimal'nogo raspredeleniia chastotno-vremennogo resursa v sistemakh podvizhnoi radiosviazi. diss. doktora tekhn. nauk* [Methods the Optimal Allocation of Time-Frequency Resource in Mobile Radio Systems. Dr. habil. thesis]. Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 2005, 351 p. (in Russian).

59. Skorovarov A. S. Puti povysheniia effektivnosti funktsionirovaniia aviatsionnykh sredstv obmena informatsiei s PPRCh v usloviakh pomekh [Method of pseudorandom reorganization of working frequency]. *Sbornik trudov X Nauch. Tekhn. Konferentsii "Problemy radiosviazi"* (Proceedings of the Conference «Problems of Radio Communication»). Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatie «Polet», 1999 (in Russian).

60. Semisoshenko M. A. *Upravlenie avtomatizirovannymi setiami dekametrovoi sviazi v usloviakh slozhnoi radioelektronnoi obstanovki* [The Management of the Automated Networks Decameter Communication in Complex Electronic Environment], St. Petersburg, Military Academy of Communications, 1997, 364 p. (in Russian).

61. Makarenko S. I. The Countermeasures of the Radio Networks with the Random Multiple Access by Changing the Radionet State to Non-Stable. *Radio electronics journal*, 2011, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (accessed 03 February 2015) (in Russian).
62. Makarenko S. I. Estimation of quality of service in radio network with package transmitting in unstationary mode under influence of external destructive factors. *Radio Electronics Journal*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (accessed 03 February 2015) (in Russian).
63. Vladimirov V. I. *Informatsionnye osnovy radiopodavleniia linii radiosviazi v dinamike radioelektronnogo konflikta* [Information basis of the countermeasure of radio communications in the dynamics of electronic conflict]. Voronezh, Voronezh Institute of Radioelectronics, 2003, 276 p. (in Russian).
64. Babusenko S. I., Isaev V. V. Statisticheskoe modelirovanie mnogoproletnykh setei paketnoi radiosviazi [Statistical modeling of multi-span of packet radio networks]. *Proceedings of the Scientific Conference "Technique of communication"*, Voronezh, Scientific Research Institute of Communications, 1992 (in Russian).
65. Babusenko S. I., Isaev V. V. Analiticheskaya model' marshrutizatsii v paketnoi radioseti [Analytical model of routing in packet radio networks], *18 Konferentsiia "Tekhnika sredstv svyazi"* (Proceedings of the Scientific Conference «Technique of communication»), Voronezh, Scientific Research Institute of Communications, 1992 (in Russian).
66. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. Issledovanie kanal'nykh i setevykh parametrov kanala svyazi v usloviakh dinamicheskoi izmeniaiushcheisya signal'no-pomekhovoi obstanovki [The Research of Data Link Layer and Network Layer Parameters of Communication Channel in the Conditions Dynamic Vary of the Signal and Noise Situation]. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (accessed 3 March 2014) (in Russian).
67. Aven O. I., Gurin N. N., Kogan Ia. A. *Otsenka kachestva i optimizatsiia vychislitel'nykh system* [Quality Assessment and Optimization of Computing Systems.] Moscow, Nauka, Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1982.
68. Voitkevich K. L. *Metody upravleniia trafikom v nazemno-vozdushnykh setiakh svyazi* [Methods of traffic management in ground-air communication networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatie "Polet", 1998, 375 p. (in Russian).
69. Alekhin S. V., Voitkevich K. L. Modelirovanie protokola marshrutizatsii dlia besprovodnykh mobil'nykh setei [Routing Protocol's Simulation for Wireless Mobile Networks]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, no. 7, pp. 7-8 (in Russian).
70. Voytkovich K. L., Sulima A. A., Zats P. A. Problemy postroeniia kanala upravleniia bespilotnymi letatel'nyimi apparatami na osnove DKMV-radiolinii [The Problem of Constructing a Control Channel of Unmanned Aerial Vehicles Based on DKMV -Radio]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, no. 7, pp. 9-11 (in Russian).

71. Voytkevich K. L., Rezvov A. V., Shanin V. N. Spetsializirovannye lokal'nye besprovodnye mobil'nye seti grazhdanskogo i voennogo naznacheniia [Specialized Local Wireless Mobile Networks for Civil and Military Purposes]. *Sistemy i sredstva sviazi, televideniia i radioveshchaniia*, 2013, № 1-2, pp. 130-133 (in Russian).

72. Komiakov A. V., Voytkevich K. L., Sulima A. A. Innovatsionnye resheniia dlia perspektivnykh letatel'nykh apparatov [Innovative Solutions for Advanced Aircraft]. *The inter-industry almanac "Delovaia slava Rossii"*, 2013, vol. 41, no. 3, pp. 26-27 (in Russian).

73. Belousov Ye. L., Keystovich A. V., Voytkevich K. L., Bryantsev V. Ph., Sayphetdinov Kh. I. Sovremennoe oborudovanie seti aviatsionnoi elektrosviazi [Modern Equipment of the Aeronautical Network]. *Sistemy i sredstva sviazi, televideniia i radioveshchaniia*, 2012, no. 1-2, pp. 70-73 (in Russian).

74. Belousov Ye. L., Bryantsev V. Ph., Voytkevich K. L., Keystovich A. V., Sayphetdinov Kh. I. Voprosy sozdaniia aviatsionnogo radiosviaznogo oborudovaniia po printsipu «programmiruemoie radio» [Issues of Developing Aviation Radio Communication Equipment on "Software-Defined Radio" Principle]. *Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev*, 2012, vol. 95, no. 2, pp. 11-18 (in Russian).

75. Belousov Ye. L., Bryantsev V. Ph., Voytkevich K. L., Keystovich A. V., Sayphetdinov Kh. I. Perspektivnoe bortovoe oborudovanie seti aviatsionnoi radiosviasi [Advanced Airborne Equipment for the Aviation Radio Communication Network]. *Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev*, 2012, vol. 96, no. 3, p. 11 (in Russian).

76. Voytkevich K. L. Opyt po sozdaniuu bortovykh kompleksov sviazi dlia samoletov takticheskogo zvena upravleniia [Experience on Creation of Onboard Complexes of Communication for Planes of a Tactical Control Link.]. *Sistemy i sredstva sviazi, televideniia i radioveshchaniia*, 2009, no. 1-2, pp. 42-43 (in Russian).

77. Chen C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks. *Wireless Networks*, 2005, no. 11, pp. 507–521.

78. Chen C., Ekici E., Akyildiz I. F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks. *Proceedings of the 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia*. ACM, 2002, pp. 109-116.

79. Duresi A., Dash D., Anderson B. L., Kannan R., Kota S., Jain R. Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture. *Aerospace Conference, IEEE*, 2004, vol. 2 pp. 1086-1104.

80. Akyildiz I. F., Ekici E., Bender M. D. MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, vol. 10, no. 3, pp. 411-424.

81. Tsvetkov K. Y., Akmolov A. F., Efimov S. N., Viktorov E. A., Veremchuk A. S. Kontseptsiiia postroeniia raznovysotnoi mnogosputnikovoi sistemy sviazi s mobil'nyimi abonentami: algoritm rasshiriaiushegosia poiska mobil'nykh abonentov [Concept of communication network formation with mobile subscribers based by multitude of satellites on miscellaneous height: the algorithm expanding

search mobile subscribers]. *Works of Military-space academy of the name A.F. Mozhasyskiy*, 2014, no. 642, pp. 41-48 (in Russian).

82. Tsvetkov K. Y., Rodionov A. V., Akmolov A. F., Efimov S. N., Viktorov E.A. Kontseptsiiia postroeniia raznovysotnoi mnogosputnikovoi sistemy sviazi s mobil'nymi abonentami: ballisticheskoe postroenie [Concept of communication network formation with mobile subscribers based by multitude of satellites on miscellaneous height: ballistic construction]. *Works of Military-space academy of the name A.F. Mozhasyskiy*, 2012, no. 634, pp. 45-55 (in Russian).

83. Tsvetkov K. Y., Rodionov A. V., Akmolov A. F., Efimov S. N., Viktorov E.A. Kontseptsiiia postroeniia raznovysotnoi mnogosputnikovoi sistemy sviazi s mobil'nymi abonentami: varianty realizatsii bortovogo kommunikatsionnogo oborudovaniia sputnika-retransliatora [Concept of communication network formation with mobile subscribers based by multitude of satellites on miscellaneous height: options for the implementation of on-Board communication equipment of satellite repeater]. *Works of Military-space academy of the name A.F. Mozhasyskiy*, 2012, no. 635, pp. 5-13 (in Russian).

84. Tsvetkov K. Y., Akmolov A. F., Efimov S. N., Viktorov E. A., Veremchuk A. S. Kontseptsiiia postroeniia raznovysotnoi mnogosputnikovoi sistemy sviazi s mobil'nymi abonentami: printsipy postroeniia shliuzovykh stantsii i apparatury potrebitelei [Concept of communication network formation with mobile subscribers based by multitude of satellites on miscellaneous height: principles of lock stations and consumers equipment construction]. *Works of Military-space academy of the name A.F. Mozhasyskiy*, 2013, no. 638, pp. 16-24 (in Russian).

Статья поступила 30 мая 2015 г.

Информация об авторе

Аганесов Артур Валерьевич – соискатель ученой степени кандидата наук. Помощник начальника учебного отдела. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: маршрутизация информационных потоков и ретрансляция сообщений в воздушно-космических сетях связи; Mesh-технологии. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

Адрес: Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

Model of Satellite Network with S-Aloha Protocol

Aganesov A. V.

Statement of the problem. The creation of the united aerospace communication networks makes it relevant routing and relaying of messages required with a given quality of service traffic. **Purpose** is development of a model of a satellite network with S-Aloha Protocol witch unites Radio Network. We will investigate the impact of transit traffic on air networks to efficient of bandwidth and time message transmission in satellite communication network. We used S-Aloha **methods** in model of a satellite network. **The element of novelty** of the presented model is given as the loads of the individual air communication

networks. **Practical relevance:** we intend to use presents a model for rationale opportunities for relay of transit connections in air communication networks. These results will be used for mathematical software routers of aerospace communication networks, built by Mesh technology. The OpenFlow protocol can be used for software-defined networks SDN.

Keywords: satellite network, relay traffic, routing, satellite network, radio networks, S-Aloha.

Information about Author

Aganesov Artur Valer'evich - Doctoral Student. Assistant of head of training department. Military Training and Research Center of the Air Force "Military Air Academy Named After Professor N. E. Zhukovsky and Ju. A. Gagarin". Field of research: traffic routing and message relay in aerospace communication networks; Mesh-networks. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

Addres: Russia, 355000, Voronezh, Street of Old Bolsheviks, 54a.

УДК 004.72

Оценка эффективности деструктивных программных воздействий на сети связи

Гречишников Е. В., Добрышин М. М.

Постановка проблемы: увеличение количества деструктивных программных воздействий на сети связи интегрированных в мировое информационное пространство, требует от должностных лиц своевременной оценки уровня защищенности. Имеющиеся научно-технические решения по оценке уровня защищенности сети связи от деструктивных программных воздействий не учитывают ресурсы злоумышленника по вскрытию сети связи и деструктивному воздействию на неё. На основании статистических данных злоумышленник не всегда способен достоверно вскрыть структуру сети связи, а также обладает ограниченными ресурсами воздействия. **Методы:** моделирование функционирования элементов сети связи средств вскрытия и деструктивного воздействия, имеющихся у злоумышленника. **Результаты:** использование предложенного способа оценки эффективности деструктивных программных воздействий на сети связи позволяет на основании статистических данных о возможностях злоумышленника, определить уровень защищенности сети связи. На основании уровня защищенности сети связи, должностные лица принимают решение о ее реконфигурации. Сравнительный анализ существующих способов и предлагаемого способа показал, что защищённость элементов сети связи увеличивается от 5 до 9 %. Улучшение защищённости элементов сети связи подверженных внешним деструктивным воздействиям обусловлено повышением достоверности оценки возможностей злоумышленника по вскрытию сети связи и эффективности использования ресурсов воздействий имеющихся у злоумышленника, а так же своевременной реконфигурации сети связи. Кроме того повышение защищённости достигается, за счет маскировки сети под сети связи функционирующие в указанном районе. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы для защиты сетей связи интегрированных в мировое информационное пространство от внешних деструктивных воздействий. При использовании представленного предложения обеспечивается: требуемая защищённость структурных элементов и сети связи в целом за счёт оценки возможности злоумышленника по вскрытию сети связи, оценки эффективности использования ресурсов воздействий имеющихся у злоумышленника.

Ключевые слова: сеть связи, уровень защищённости, вскрытие, воздействие, мониторинг.

Актуальность

В настоящее время для дезорганизации систем управления различных объектов и организаций, злоумышленниками все чаще используются средства деструктивных программных воздействий (ДПВ) на сети связи. Под информационно-техническими воздействиями понимаются применение способов и средств воздействия на информационно-технические объекты, на технику и т.п. в интересах достижения поставленных целей. Интеграция сетей связи во все сферы деятельности современного общества способствовала появлению различных групп и организаций (например киберсообщество Anonymous), способных своими действиями существенно влиять на эффективность функционирования различных организаций и объектов.

Устойчивое функционирование информационных ресурсов и сетей связи имеет исключительное значение для динамического развития экономики и социальной сферы, а так же для защиты суверенитета государства [1].

Для обеспечения безопасности в информационной сфере в настоящее время разработаны и используются ряд научно-технических решений по защите сетей связи от внешних деструктивных воздействий, однако они имеют ряд системных противоречий [2-6]. В большинстве из этих решений количественный и качественный состав ресурсов злоумышленника по вскрытию и деструктивному воздействию не учитывается или считается, что злоумышленник заведомо обладает возможностью максимально точно вскрыть топологию сети связи и располагает необходимым количеством сил и средств, а свои деструктивные воздействия осуществляет слаженно и организованно. При этом не учитываются или учитываются не в полной мере возможности системы защиты по затруднению вскрытия сети связи и воздействию. Исходя из проведенного анализа [2-8] злоумышленник не всегда способен полностью и достоверно вскрыть структуру сети связи. Кроме того, у злоумышленника могут быть ограничены ресурсы и он не всегда слаженно воздействует на сети связи или не успевает своевременно воздействовать на них. Этим вопросам и посвящена настоящая статья.

Оценка эффективности деструктивных программных воздействий на сети связи

Для решения указанных противоречий разработаны варианты по оценке эффективности деструктивных программных воздействий на сети связи. Разработанные предложения заключаются в том, что на основании анализа данных о значениях параметров развернутых в указанном районе сетей связи и значений параметров злоумышленника по вскрытию сети связи и воздействию на нее создают модель планируемой к развертыванию сети связи. На основе разработанной модели имитируют действия злоумышленника, а так же оценивают эффективность этих действий [9].

Предложения поясняются структурно-логической последовательностью (рис. 1), где (блок 1 на рис. 1) на этапе планирования сети связи измеряют основные технические параметры элементов функционирующих в указанном районе сетей связи (D_{nip}^{cc}). Осуществляют создание базы данных измеренных параметров. Ранжируют измеренные параметры существующих сетей связи. Производят выбор из перечня параметров наиболее значимых, исходя из критерия максимальной информативности демаскирующих признаков для злоумышленника.

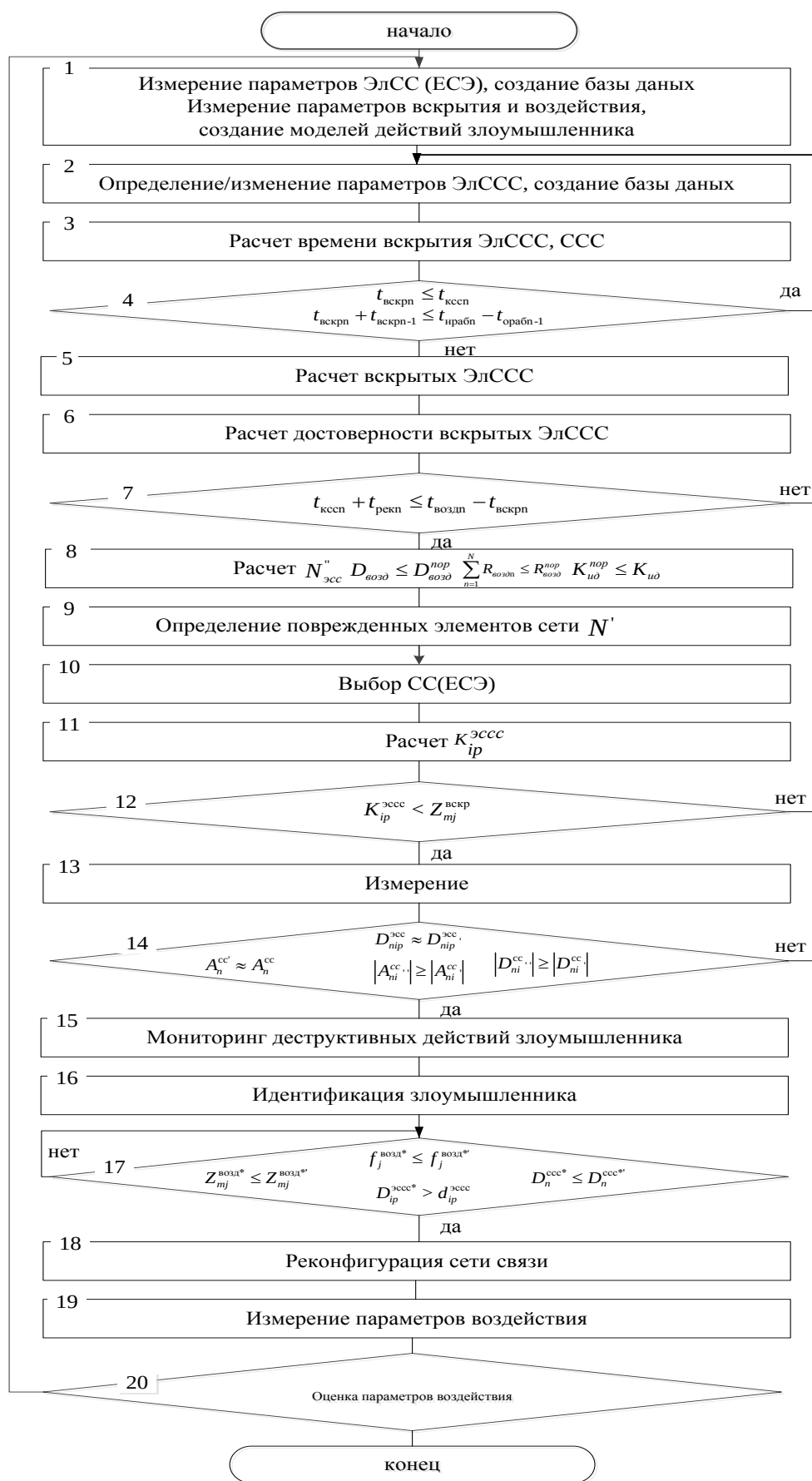


Рис. 1. Структурно-логическая последовательность оценки эффективности деструктивных программных воздействий на сети связи

Измеряют параметры вскрытия сети связи злоумышленником ($Z_{mj}^{\text{вскр}}$) и воздействия ($Z_{mj}^{\text{возд}}$) на сеть связи, где m - значение параметра вскрытия (воздействия) сети связи, а j - идентификационный признак злоумышленника. Идентифицируют оборудование и создают модели действий j -го злоумышленника по вскрытию ($f_j^{\text{вскр}}$) и воздействию ($f_j^{\text{возд}}$) на сеть связи. Создают базу данных измеренных параметров и моделей.

Далее (блок 2 на рис. 1) задают технические параметры, определяющие топологию (A^{ccc}) и технические параметры ($D_p^{\text{эccc}}$) элементов создаваемой сети связи.

На основании измеренных значений (блок 3 на рис. 1) и анализа демаскирующих признаков аппаратуры связи, рассчитывается: время необходимое злоумышленнику для поиска n -го элемента сети связи ($t_{\text{поиск}n}$), время, необходимое злоумышленнику для распознавания элемента сети связи ($t_{\text{распн}}$), время необходимое для вскрытия n -ого элемента сети связи ($t_{\text{вскр}n}$). Так же определяют время реконфигурации сети связи ($t_{\text{рекн}}$) и квазистационарного состояния n -ого элемента сети связи ($t_{\text{кссн}}$). Под временем квазистационарного состояния n -ого элемента сети связи понимается период времени от первого вхождения в связь с абонентом до окончания последнего сеанса связи этого элемента.

Возможности злоумышленника по вскрытию элемента сети связи предлагается оценивать по критерию (блок 4 на рис. 1):

$$t_{\text{вскр}n} \leq t_{\text{кссн}}, \quad (1)$$

При не выполнении условия (1) делается вывод о том, что злоумышленник не успевает вскрыть элемент сети связи.

Если условие (1) выполняется, то возможности злоумышленника по вскрытию сети связи в целом оцениваются по следующему критерию:

$$\sum_{n=1}^N t_{\text{вскр}n} \leq \sum_{n=1}^N t_{\text{кссн}}, \quad (2)$$

где $\sum_{n=1}^N t_{\text{вскр}n}$ – время вскрытия сети связи, $\sum_{n=1}^N t_{\text{кссн}}$ – время квазистационарного состояния сети связи, N – количество элементов сети связи.

При не выполнении условия (2) делается вывод о том, что злоумышленник не успевает вскрыть сеть связи.

При выполнении указанных условий (1, 2) считают элемент сети связи вскрытым, если одно из условий не выполняется (1, 2) элемент не вскрыт.

Возможности злоумышленника по вскрытию элементов сети связи и сети связи в целом (рис. 2) оцениваются по следующим критериям:

$$t_{\text{вскр}n} \leq t_{\text{кссн}}, \quad (3)$$

$$t_{\text{вскр}n} + t_{\text{вскр}n-1} \leq t_{\text{нраб}n} - t_{\text{ораб}n-1}, \quad (4)$$

где $t_{\text{вскр } n-1}$ – время вскрытия $(n-1)$ -ого элемента сети связи, $t_{\text{нраб } n}$ – время начала функционирования n -ого элемента сети связи, $t_{\text{ораб } n-1}$ – время окончания функционирования $(n-1)$ -ого элемента сети связи.

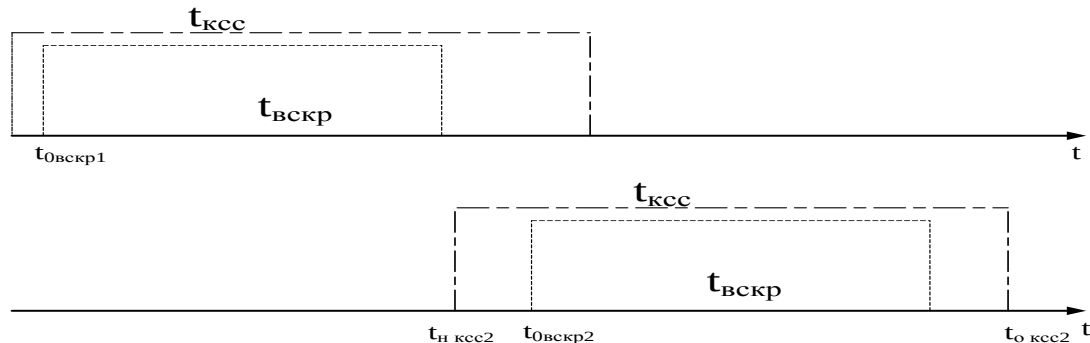


Рис. 2. Соотношения времени вскрытия элементов сети связи и их квазистационарного состояния

При не выполнении условий (3, 4) делается вывод о том, что злоумышленник не имеет средств для вскрытия сети связи.

В блоке 5 рис. 1 рассчитывают значения весовых коэффициентов вскрытых элементов сети ($R_{\text{вскр } n}$), а так же определяют число вскрытых элементов сети связи ($N_{\text{эсс}}^{\text{вскр}}$). Далее осуществляется расчёт достоверности вскрытия сети связи.

$$D_{\text{вск}} = \frac{N_{\text{эсс}}^{\text{вскр}}}{N_{\text{эсс}}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{вск}}$ – достоверность вскрытия сети связи.

В блоке 6 рис. 1 осуществляется оценка достоверности вскрытия сети связи согласно критериям:

$$D_{\text{вск}} \leq D_{\text{вскр}}^{\text{пор}}, \quad (6)$$

где $D_{\text{вскр}}^{\text{пор}}$ – пороговая достоверность вскрытия сети связи.

$$\sum_{n=1}^N R_{\text{вскр } n} \leq R_{\text{вскр}}^{\text{пор}}. \quad (7)$$

где $\sum_{n=1}^N R_{\text{вскр } n}$ – сумма весовых коэффициентов вскрытых элементов сети связи;

Если достоверность вскрытия сети связи ($D_{\text{вск}}$) или сумма весовых коэффициентов вскрытых элементов сети ($\sum_{n=1}^N R_{\text{вскр } n}$) не соответствуют критериям (6, 7), то производят реконфигурацию сети связи.

Если условия (6, 7) выполнены в блоке 6 производят расчёт времени, требуемого злоумышленнику для принятия решения о воздействии на n -ый элемент сети связи ($t_{\text{возд } n}$).

В блоке 7 рис. 1 осуществляется оценка возможностей злоумышленника по воздействию на элементы сети связи по формуле:

$$t_{\text{кспл}} + t_{\text{рекп}} \leq t_{\text{воздп}} - t_{\text{вскрп}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{рекп}}$ – время реконфигурации сети связи; $t_{\text{воздп}}$ – время, необходимое средствам воздействия злоумышленника для воздействий на элемент сети связи (рис 3).

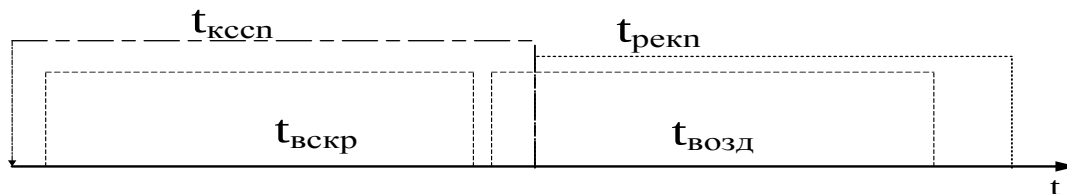


Рис. 3. Соотношение времен функционирования элемента сети связи, вскрытия и воздействия на него злоумышленником

В блоке 8 рис. 1 осуществляется расчёт количества элементов сети связи подвергшихся воздействию ($N''_{\text{эсц}}$) и достоверности воздействия злоумышленником на сеть связи.

Оценка достоверности воздействия на сеть связи злоумышленником осуществляется согласно формулам:

$$D_{\text{возд}} \leq D_{\text{возд}}^{\text{пор}}, \quad (9)$$

где $D_{\text{возд}}^{\text{пор}}$ – пороговая достоверность воздействия на сеть связи.

$$\sum_{n=1}^N R_{\text{воздп}} \leq R_{\text{возд}}^{\text{пор}}. \quad (10)$$

где $\sum_{n=1}^N R_{\text{воздп}}$ – сумма весовых коэффициентов элементов сети связи подвергшихся воздействию, $R_{\text{возд}}^{\text{пор}}$ – сумма пороговых значений весовых коэффициентов подвергшихся воздействию элементов сети связи.

Расчёт и сравнение коэффициента исправного действия сети связи с пороговым значением осуществляется согласно неравенства:

$$K_{\text{ид}}^{\text{пор}} \leq K_{\text{ид}}, \quad (11)$$

Если достоверность воздействия на сети связи ($D_{\text{возд}}$) или сумма весовых коэффициентов подвергшихся воздействию элементов сети связи ($\sum_{n=1}^N R_{\text{воздп}}$) или коэффициент исправного действия ($K_{\text{ид}}$) не отвечают условиям (9-11), то производится реконфигурация модели сети связи.

При выполнении указанных условий (9-11) логическому коэффициенту ($i_n^{\text{повр}}$) присваивается 1, если условие не выполнено присваивается 0.

В блоке 9 рис. 1 определяют сети связи (N') на которые осуществлялась наименьшее количество деструктивных воздействий.

На основании анализа технических параметров ($A_n^{cc}, D_{nip}^{эcc}$) выбранных функционирующих сетей связи (N') (блок 10 рис. 1) выбирают сети связи, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к техническим параметрам ($A^{ccc}, D_{ip}^{эccc}$) создаваемой сети связи.

Коэффициенты контраста (блок 11 рис. 1), технических параметров элементов создаваемой сети связи ($K_{ip}^{эccc}$) рассчитывают по следующей формуле:

$$K_{ip}^{эccc} = \frac{D_{ip}^{эccc} - D_{nip}^{эcc}}{D_{ip}^{эccc}}, \quad (12)$$

где $K_{ip}^{эccc}$ – коэффициент контраста технического параметра элемента создаваемой сети связи, $D_{ip}^{эccc}$ – значение технических параметров элементов создаваемой сети связи, $D_{nip}^{эcc}$ – значение технических параметров элементов сетей связи наиболее точно удовлетворяющей техническим требованиям, i – номер элемента сети связи, p – параметр элемента функционирующей сети связи.

Далее (блок 12 рис. 1) сравнивают коэффициенты контраста технических параметров элементов создаваемой сети связи ($K_{ip}^{эccc}$) со значениями и технических параметров средств вскрытия сети связи ($Z_{mj}^{вскр}$):

$$K_{ip}^{эccc} < Z_{mj}^{вскр}, \quad (13)$$

Если условие (13) не выполняется, то принимается решение о подстройке технических параметров ($D_{ip}^{эccc}$) элементов сети связи.

На основании мониторинга технических параметров функционирующих сети связи ($A_n^{cc}, D_{nip}^{эcc}$) (блок 13 рис. 1), осуществляется поиск впервые введенных в эксплуатацию сетей связи, а так же оцениваются параметры других функционирующих сетей связи ($A_n^{cc}, D_{nip}^{эcc}$). Измеренные параметры ($A_n^{cc}, D_{nip}^{эcc}$) оцениваются согласно следующих соотношений:

$$A_n^{cc'} \approx A_n^{cc}, \quad (14)$$

$$D_{nip}^{эcc} \approx D_{nip}^{эcc'}, \quad (15)$$

$$|A_{ni}^{cc'}| \geq |A_{ni}^{cc}|, \quad (16)$$

$$|D_{ni}^{эcc'}| \geq |D_{ni}^{эcc}|, \quad (17)$$

Если одно из соотношений (14-17) не выполняется, то (блок 14 рис. 1) принимается решение о перестройке p -х параметров созданной сети.

Во время функционирования сети связи (блок 15 рис. 1) осуществляют мониторинг признаков и действий злоумышленника по воздействию на созданную сеть связи. На основании выбранных критериев осуществляют фиксацию факта начала деструктивного воздействия на созданную сеть связи [9].

На основании статистических данных индивидуальных особенностей принимают решение о идентификации принадлежности аппаратуры определённому злоумышленнику (блок 16 рис. 1).

На основании имеющихся моделей действий злоумышленника по информационно-техническим воздействиям, (блок 17 рис. 1) осуществляют сравнение прогнозируемых параметров воздействия ($Z_n^{\text{возд}*}$, $f_j^{\text{возд}*}$, $D_n^{\text{сccc}*}$), с фактическими значениями ($Z_n^{\text{возд}*}$, $f_j^{\text{возд}*}$, $D_n^{\text{сccc}*}$), а так же осуществляют сравнение фактических параметров созданной сети связи подверженной воздействию ($D_n^{\text{снп}^*}$) и минимальных параметров сетей связи подвергшихся деструктивному воздействию, при которых созданная сеть связи будет выполнять функциональные задачи ($d_n^{\text{сcc}}$). Сравнение осуществляется согласно следующих неравенств:

$$Z_{mj}^{\text{возд}*} \leq Z_{mj}^{\text{возд}*}, \quad (18)$$

$$f_j^{\text{возд}*} \leq f_j^{\text{возд}*}, \quad (19)$$

$$D_n^{\text{сcc}*} \leq D_n^{\text{сccc}*}, \quad (20)$$

$$D_{ip}^{\text{эсcc}*} > d_{ip}^{\text{эсcc}}. \quad (21)$$

Если одно из неравенств (18-21) не выполняется, то принимают решение о реконфигурации сети связи.

В блоке 18 рис. 1 измеряют параметры воздействия на созданную сеть связи и на основании выбранных критериев принимают решение об окончании деструктивного воздействия [9].

В блоке 19 рис. 1 оценивают результаты воздействия на сеть связи. Оценка наличия у злоумышленника средств воздействия осуществляется согласно неравенства:

$$N'_{\text{возд}} > N''_{\text{эсcc}}, \quad (22)$$

где $N'_{\text{возд}}$ – фактическое количество средств воздействия на сеть связи имеющиеся у злоумышленника; $N''_{\text{эсcc}}$ – предполагаемое количество повреждённых элементов сети связи.

На основании неравенства (22) осуществляется вывод о наличии средств воздействия ($N_{\text{возд}}$) у злоумышленника.

Оценка возможностей злоумышленника по вскрытию элементов сети связи осуществляется согласно неравенства:

$$N'_{\text{возд}} \leq N_{\text{возд}}, \quad (23)$$

где $N_{\text{возд}}$ – предполагаемое количество средств воздействия.

$$N''_{\text{эсcc}} < z_{mj}^{\text{вскр}}, \quad (24)$$

где $N''_{\text{эсcc}}$ – фактическое количество повреждённых элементов сети связи.

На основании неравенств (23, 24) делается вывод о способности злоумышленника своевременно вскрыть ($t_{\text{вскрп}}$) сеть связи.

Если значения параметров деструктивного воздействия на созданную сеть связи не соответствуют имеющимся в базе данных, или параметры сети связи подвергшейся воздействию не соответствуют заданным значениям, то (блок 20

рис. 1) на основе имеющихся параметров деструктивного воздействия осуществляют оценку возможностей злоумышленника по вскрытию созданной сети связи и деструктивному воздействию на неё. Определяют количество средств вскрытия и средств деструктивного воздействия имеющихся у злоумышленника.

На основании произведённой оценки осуществляется дополнение статистических данных о возможностях вскрытия сети связи и воздействия на сеть связи злоумышленником.

Выводы

Сравнительный анализ значений показателей защищённости некоторых существующих способов защиты сетей связи от внешних деструктивных воздействий [9, 10] и предлагаемого способа показал, что защищённость элементов сети связи увеличивается от 5 до 9 % [11]. Расчёт производился в GPSS World.

Улучшение защищённости элементов сети связи подверженных внешним деструктивным воздействиям обусловлена повышением оценки достоверности вскрытия злоумышленником топологии сети связи, оценки эффективности использования ресурсов воздействий имеющихся у злоумышленника, а так же своевременной реконфигурации сети связи исходя из анализа возможностей злоумышленника. Кроме того, повышение защищённости достигается за счет маскировки сети под сети связи, функционирующие в указанном районе. Проведение мониторинга признаков или действий злоумышленника по вскрытию сети связи и воздействию на нее повышает оперативность принятия решения на реконфигурацию сети связи в рамках обеспечения ее защищенности.

Предлагаемое техническое решение может быть использовано при проектировании мультисервисных сетей для обеспечения требуемой защищённости технических разведок и внешних информационно-технических воздействий.

Предлагаемый способ подтвержден патентом на изобретение.

Литература

1. Путин В. В. Заседание Совета Безопасности, посвящённое вопросам противодействия угрозам национальной безопасности в информационной сфере 2014. URL: <http://kremlin.ru/news> (дата обращения 01.10.2014).
2. Гречишников Е. В., Белов А. С. Способ обеспечения устойчивости сетей связи в условиях внешних деструктивных воздействий // Патент на изобретение № 2379753, 20.01.2010.
3. Гречишников Е. В., Белов А. С. Способ обеспечения устойчивого функционирования системы связи // Патент на изобретение № 240518427.11.2010.
4. Гречишников Е. В., Белов А. С. Способ (варианты) защиты системы связи от внешних деструктивных воздействий // Патент на изобретение № 2451416, 20.05.2012.

5. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69-79.
6. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2-2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf>
7. Гречишников Е. В., Добрышин М. М. Способ обеспечения защищённости сетей связи от технической компьютерной разведки. // Сборник Проблемы теории и практики развития войск ПВО СВ в современных условиях. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ. 2013. С. 43–46.
8. Гречишников Е. В., Горелик С. П., Белов А. С. Способ управления защищенностью сетей связи в условиях деструктивных программных воздействий // Телекоммуникации. 2014. № 3. С. 18-22.
9. Гудов Н. В. Система и способ уменьшения ложных срабатываний при определении сетевой атаки // Патент на изобретение № 2480937, 27.04.2013.
10. Добрышин М. М., Диденко П. М. Оценка защищённости беспроводных сетей связи // Радиотехника, электроника и связь. II Международная научно-техническая конференция. Омск: 2013. С. 155-159.
11. Гречишников Е. В., Горелик С. П. Способ (варианты) мониторинга и обеспечения требуемого качества обслуживания абонентов в мультисервисных сетях // Патент на изобретение № 2517327, 28.03.2014.
12. Гречишников Е. В., Добрышин М. М., Белов А. С., Кузьмич А. А. Способ оценки эффективности информационно-технических воздействий на сети связи // Патент на изобретение № 2541205, 24.12.2014.

References

1. Putin V. V. Zasedaniye Soveta Bezopasnosti, posvyashchennoye voprosam protivodeystviya ugrozam natsional'noy bezopasnosti v informatsionnoy sfere 2014 [Meeting of the Security Council on questions of counteraction to threats to national security in the information sphere 2014] Available at: <http://kremlin.ru/news> (accessed 01.10.2014) (in Russia).
2. Grechnikov E. V., Belov A. S. *Sposob obespecheniya ustoychivosti setey svyazi v usloviyakh vneshnikh destruktivnykh vozdeystviy* [Method to ensure the stability of networks under external destructive influences]. Patent Russia, no. 2379753, 2010 (in Russia).
3. Grechnikov E. V., Belov A. S. *Sposob obespecheniya ustoychivogo funktsionirovaniya sistemy svyazi* [Method to ensure sustainable operation of the communication system]. Patent Russia, no. 2405184, 2010 (in Russia).
4. Grechnikov E. V., Belov A. S. *Sposob (varianty) zashchity sistemy svyazi ot vneshnikh destruktivnykh vozdeystviy* [Method (versions) protect communication systems from external destructive influences]. Patent Russia, no. 2451416, 2012 (in Russia).
5. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 4, pp. 69–79 (in Russian).

6. Makarenko S. I. *Podavlenie paketnux radiosetey so slyhainum mnogestvennum dostypom za shet destabilizacii ix sostojnij* [The countermeasures of the radio networks with the random multiple access by changing the radionet state to non-stable]. *Radio electronics journal*, 2011, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (in Russian).

7. Grecihnikov E. V., Dobrithin M. M. *Podavleniye paketnykh radiosetey so sluchaynym mnozhestvennym dostupom za schet destabilizatsii ikh sostoyaniya* [Method of facilitating secure communication networks from technical computer intelligence. Collection of problems of the theory and practice of development of air defense troops of PVO SV in modern conditions]. Smolensk, Military Academy of army air defence of the Armed Forces of the Russian Federation Publ., 2013, pp. 43–46 (in Russia).

8. Grecihnikov E. V., Gorelik S. P., Belov A. S. *Sposob upravleniya zashchishchennost'yu setey svyazi v usloviyakh destruktivnykh programmnykh vozdeystviy* [A method of controlling the security of communication networks in terms of destructive program influences]. *Telecommunications*, 2014, no. 3, pp. 18-22 (in Russia).

9. Goodov N. V. *Sistema i sposob umen'sheniya lozhnykh sratyvaniy pri opredelenii setevoy ataki* [System and a method of reducing false positives when identifying network attacks]. Patent Russia, no. 2480937, 2013 (in Russia).

10. Dobrushin M. M., Didenko P. M. *Otsenka zashchishchonnosti besprovodnykh setey svyazi* [Evaluate the security of wireless networks communication]. *Radio engineering, electronics and communication. II international scientific and technical conference*, Omsk, 2013, pp. 155-159 (in Russia).

11. Grecihnikov E. V., Gorelik S. P. *Sposob (varianty) monitoringa i obespecheniya trebuyemogo kachestva obsluzhivaniya abonentov v mul'tiservisnykh setyakh* [Method monitor and ensure the required quality of customer service in multiservice networks]. Patent Russia, no. 2517327, 2014 (in Russia).

12. Grecihnikov E. V., Dobrithin M. M. *Sposob otsenki effektivnosti informatsionno-tehnicheskikh vozdeystviy na seti svyazi* [Method of evaluating the effectiveness of ICT impacts on the communication network]. Patent Russia, no. 2541205, 2014 (in Russia).

Статья поступила 19 июня 2015 г.

Информация об авторах

Гречишников Евгений Владимирович – доктор технических наук, доцент. Сотрудник Академии ФСО России. Область научных интересов: информационное противоборство.

Добрышин Михаил Михайлович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Сотрудник Академии ФСО России. Область научных интересов: мониторинг защищенности элементов сети связи от информационно-технических воздействий. E-mail: dobrithin@ya.ru

Адрес: 302028, Россия, г. Орел, Приборостроительная 35а.

Performance Evaluation of Destructive Effects Software in the Communications Network

Grecihnikov E. V., Dobrushin M. M.

Purpose: increasing the number of destructive software effects on network integrated into the global information space, requires officials timely assessment of the level of security. Existing scientific and technical solutions to assess the security level of the communications network of the destructive impact of the programs do not take into account the resources of the attacker by autopsy a communication network and destructive impact on her. Based on statistics the attacker is not always able to reliably reveal the structure of the network, as well as has the impact of limited resources. **Methods:** A simulation of the elements of the communication network means autopsy and destructive impacts available to the attacker. **Results:** The use of the proposed method of assessing the effectiveness of the destructive impacts of the program on the network allows on the basis of statistical data on the possibilities of an attacker to determine the level of security of the communication network. Based on the level of security of communication networks, officials decide on its reconfiguration. Comparative analysis of existing methods and the proposed method shows that The security elements of the communication network is increased from 5 to 9%. Improving the security of network elements susceptible to external disruptive impact due to increased reliability of the assessment as deterrents for autopsy network and effective use of resources available to the attacker's actions, as well as timely communication network reconfiguration. Further increase of security is achieved by masking the network under the network autopsy in that area. **Practical significance:** The results can be used to protect the networks integrated into the global information space from external destructive impact. By using of the proposal is provided by: The security required structural elements and networks in general due to assess the possibility of an attacker by autopsy a communication network, evaluate the effectiveness of the use of resources available to the attacker's actions.

Keywords: communications network, level of security, autopsy, impact.

Information about Authors

Grecihnikov Evgeny Vladimirovich - Dr. habil. of Engineering Sciences, Associate Professor. The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: information warfare.

Dobrushin Mikhail Mikhailovich - Doctoral Student. The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: monitoring security elements of the communication network from the information technology influences. E-mail: dobrithin@ya.ru

Address: Russia, 302028, Orel, Priborostroitel'nyy 35A.

УДК 330.101

Сценарный подход к логическому моделированию систем рыночной экономики

Юдицкий С. А.

Цель работы: Предложена методология двухуровневого сценарного подхода к логическому моделированию поведения систем рыночной экономики. **Используемые методы:** На первом (верхнем) уровне выстраивается рамочный (абстрактный) сценарий, ориентированный на специалистов в предметной области, и на его основе выполняется предварительная формальная проверка корректности исходных знаний о поведении систем рыночной экономики (с фильтрацией соответствующих ошибок). На втором (нижнем) уровне рамочный сценарий преобразуется в детальное объектно-ориентированное описание – структурный сценарий, по которому проводится имитационное моделирование поведения систем рыночной экономики.

Ключевые слова: абстрактный сценарий, структурный сценарий, факторно-целевой анализ, ситуационный анализ, динамическое моделирование, поточная диаграмма, сеть Петри, жизненный цикл объектов, достижимость целей моделирования, конвейерно-временная диаграмма

Введение. Основные понятия

Системы рыночной экономики (СРЭ) отличаются рядом свойств, в том числе:

- продукция, выпускаемая СРЭ, поступает потребителю через рынок, т.е. потребитель может выбрать нужный ему продукт из множества возможных;
- ресурсы, потребляемые СРЭ, приобретаются через рынок;
- поведение СРЭ определяется потоками объектов (материальных, информационных, финансовых и т.д.), поступающими на вход, циркулирующими в системе и снимаемыми с ее выхода. В СРЭ может одновременно находиться множество объектов;
- поведение СРЭ направлено на достижение определенных поставленных перед ней целей;
- влияние среды, в которой функционирует СРЭ, характеризуется определенным набором факторов (экономических, политических, социальных), влияющих на достижимость целей.

Промоделировать поведение СРЭ – это значит определить характеристики действующих в системе объектных потоков и оценить степень достижения целей, указанных в сценарии. Наиболее популярны два вида сценариев. Согласно одному из них [8] сценарий определен как способ функционирования системы с известной архитектурой (структурой), и представляется последовательностями выполнения действий – операций. Второй вид сценария [9] – это способ достижения целей с учетом факторов влияния среды. Он не исходит из архитектуры, а является ее прообразом. Применительно к СРЭ будем различать сценарий ее поведения и сценарий создания (инжиниринга) либо перестройки (реинжиниринга) системы.

Сценарий характеризуется целями, факторами влияния, операциями, межоперационными связями [13]. Цели и факторы, соотнесенные сложной системе, как правило, структурированы, состоят из подцелей и подфакторов, те из своих, и т.д., вплоть до неразложимых (атомарных) величин. При большом числе атомарных величин выполняется факторно-целевой анализ СРЭ: с учетом мнения экспертов ранжируется список таких целей и список таких факторов влияния, и из списков отбираются наиболее значимые. Для сценариев инжиниринга-реинжиниринга наряду с факторно-целевым применяется ситуационный анализ. Суть его заключается в следующем. В процессе создания или перестройки СРЭ система проходит через ряд стадий, среди которых фиксируются начальная и заключительные ситуации, определяются переходы между ситуациями. Могут возникать новые (дополнительные) внутренние цели и факторы. Приписывая выбранным целям и факторам «лингвистические» значения (типа низкий, средний, высокий и т.д.) и отображая их на балльную шкалу, а также введя экспертные вероятностные оценки достижимости целей при различных значениях факторов, подбирается оптимальная с точки зрения достижимости целей область значений внешних и внутренних факторов.

Операции и межоперационные связи [13]. Операции по-разному определяются в абстрактном и структурном сценарии (*А*-сценарии и *С*-сценарии). В *А*-сценарии не учитывается внутренняя структура объектов, операция трактуется как «черный ящик». *С*-сценарий исходит из того, что известна внутренняя структура объектов, которым (а также ресурсам) сопоставляется набор свойств-атрибутов. Атрибуты принимают значения из некоторой области, эти значения могут изменяться по определенным правилам. Операция *С*-сценария представляет собой блок, в котором помещаются объекты с одинаковым набором атрибутов, различающиеся значениями атрибутов. Объекты проходят в операционном блоке через ряд состояний, образующих «жизненный цикл» в данном блоке. Таким образом, операция *С*-сценария трактуется как класс [2], экземпляры которого (объекты) «живут» в некотором пространстве. Внутри класса помещаются данные об атрибутах объектов и правила (методы), реализующие «жизненный цикл». Удаление объектов из класса и введение объектов в новый класс сопровождается изменением состава их атрибутов, которые могут наследоваться, уничтожаться и порождаться. Объект с другим составом атрибутов - это уже новый объект, живущий в новом классе. Следовательно, межоперационные связи (как в *А*-сценарии, так и в *С*-сценарии) отображают не передачу управления, а передачу и преобразование объектов. Операция характеризуется «операционными» целями (факторами), которые могут как совпадать с целями (факторами) сценария в целом, так и вводиться специально для данной операции.

Методология логического моделирования СРЭ состоит из следующих последовательных шагов:

- 1) Формирование *А*-сценария системы;
- 2) Моделирование динамики поведения на основе *А*-сценария;
- 3) Преобразование *А*-сценария в *С*-сценарий;

4) Моделирование динамики поведения на основе *С*-сценария.

На первом шаге выполняется факторно-целевой анализ, а при инжиниринге/реинжиниринге также и ситуационный анализ СРЭ. В результате устанавливаются и цели, и факторы влияния. Далее формируется статическое графическое представление *А*-сценария. На втором шаге статическое представление трансформируется в динамическое представление в виде сети Петри [4, 5, 7], и проводится аналитическое или/и имитационное моделирование этой сети. Если в ходе моделирования обнаруживаются ошибки в *А*-сценарии, то возвращаемся к первому шагу, и повторяем цикл до тех пор, пока *А*-сценарий не будет удовлетворять экспертов. Улавливание ошибок на уровне *А*-сценария позволяет не пропустить их в *С*-сценарий, представляющий собой более детальную и более сложную модель поведения СРЭ. Цена ошибок, обнаруженных в *С*-сценарии, может на несколько порядков превышать цену ошибок, устраненных на уровне *А*-сценария.

На третьем шаге *А*-сценарий преобразуется в *С*-сценарий (структурируются объекты и ресурсы, вводятся классы объектов и переходы между ними, определяется набор интегральных показателей функционирования СРЭ, задаются зависимости степени достижимости целей СРЭ от интегральных показателей и факторов влияния).

На четвертом шаге проводится имитационное моделирование *С*-сценария СРЭ с варьированием начальных условий. Результатом имитации являются оценка достижимости поставленных целей, интегральные характеристики работы СРЭ, временные графики для атрибутов объектов и ресурсов. По результатам имитационного моделирования решают вопрос о приемлемости *С*-сценария. При отрицательном решении возвращаются к третьему шагу и повторяют итерацию (на уровне *С*-сценария) необходимое число раз.

Формирование абстрактного сценария СРЭ

Как уже говорилось выше, построение *А*-сценария принято начинать с определения наиболее значимых целей, поставленных перед СРЭ, и наиболее эффективных факторов влияния на их выполнение. Определение значимости и эффективности имеет смысл лишь на больших множествах атомарных (простых) целей и факторов, и кроме того, что еще важнее, результат оценки субъективен и зависит от личности эксперта (коллективного мнения группы экспертов). Строгие и надежные методы ранжирования и отбора среди случайных объектов и субъектов вряд ли существуют. Да они, по мнению автора, и не так уж нужны. Позитив, который дают «нестрогие» методы, заключается в лучшем понимании процессов, протекающих в системах рыночной экономики, в повышении интеллектуального уровня экспертов, в приобретении опыта потребителями. Все это в не меньшей мере относится и к методу ситуационного анализа. Предположим, что факторно-целевой и ситуационный анализ на основе практикуемых способов дали некоторый набор целей, факторов и траекторий развития ситуации (пусть и неточных). Опираясь на эти данные как примеры, определим формально-графический

инструментарий первичного описания A -сценария в виде так называемой «поточной диаграммы» [13].

Описание A -сценария поточной диаграммой. A -сценарий задается ориентированным графом типа дерева, где корневая вершина A_0 отображает сценарий в целом, а внутренние вершины A_i , $i=1, \dots, n$, соответствуют операциям процесса в СРЭ. Операции связаны между собой и с внешней средой объектными и ресурсными потоками. Вершине A_i в описании нулевого уровня соответствует описание уровня 1 со своими внутренними вершинами A_{ij} , $j=1, \dots, m$, и т.д. Модуль поточной диаграммы, пример которого дан на рис. 1, имеет наружную рамку в виде прямоугольника со скругленными углами, внутри рамки помещается операционная структура. В рамку снаружи слева входят горизонтальные стрелки, помеченные входными потоками объектов и ресурсов, а справа из рамки выходят стрелки потоков выходных объектов. Сверху и снизу в рамку входят вертикальные стрелки, помеченные соответственно отобранными целями и факторами влияния. Одноименные внешние и внутренние стрелки отождествляются. Каждой выходной наружной стрелке сопоставляется строго одна выходная внутренняя стрелка, т.е. на выход модуля диаграммы поступает поток объектов лишь от одной внутренней операции.

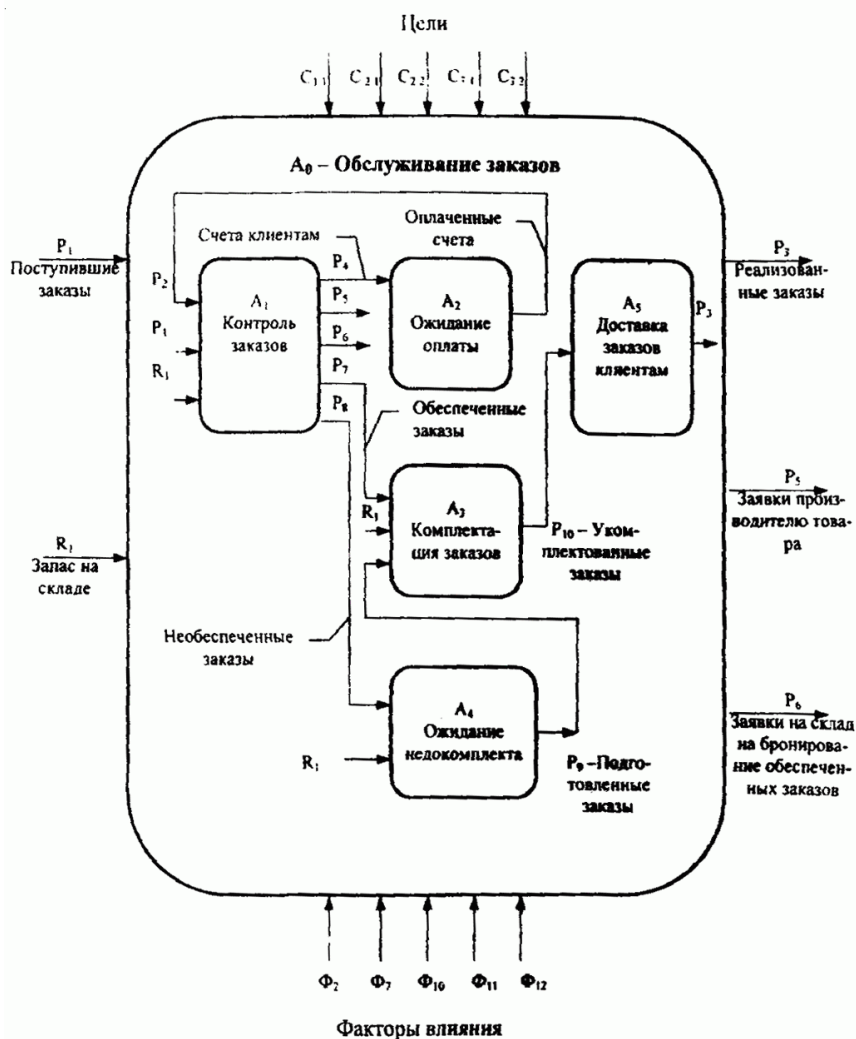


Рис. 1. A -сценарий СРЭ. Модуль A_0 поточной диаграммы

Рассмотрим подробнее функционирование модуля A_0 на рис. 1, описывающего обслуживание заказов населению. Поступающий на вход модуля поток P_1 заявок на заказы передается на операцию A_1 «контроль заказов», а поток R_1 материальных ресурсов со склада на операции A_1 , A_3 (комплектация заказов), A_4 (ожидание недокомплекта). Операция A_1 определяет обеспечен ли заказ товарами, имеющимися в данный момент на складе. Если имеется, то на склад передается заявка на бронирование этих товаров (выходной информационный поток P_6), а сами товары направляются на операцию A_3 для комплектации (внутренний поток P_7). Если товаров на складе нет, то заявка отправляется производителю товара (выходной поток P_5), а заявки передаются операции A_4 для ожидания недокомплекта (внутренний поток P_8). Операция A_1 , кроме того, формирует счета клиентам (внутренний поток P_4), которые передаются на операцию A_2 ожидания оплаты. Оплаченные счета (внутренний поток P_2) возвращаются на операцию A_1 . При составлении блока сценария A_0 предполагалось, что при выполнении A_1 обрабатываются только оплаченные заказы. Здесь сознательно в A -сценарий были внесены ошибки. Забегая вперед, скажем, что эти ошибки будут выявлены (и устранены) на этапе проверки корректности A -сценария.

Операция A_4 непрерывно проверяет достаточен ли ресурс R_1 для ожидающих заявок. Если некоторые из них становятся обеспеченными товаром, то они передаются операции A_3 (внутренний поток P_9), также, как и заявки из потока P_7 . Операция A_3 изымает из ресурса R_1 необходимые товары, уменьшая тем самым величину R_1 , и направляет укомплектованные заказы на операцию A_5 – доставку заказов клиентам (внутренний поток P_{10}). Операция A_5 формирует выходной поток P_3 реализованных заказов.

Внутренние операции «родительского» корневого модуля A_0 сценария разветвляются в подобные модули, принадлежащие следующему уровню (их называют «потомками»). Согласованность родительского модуля и модулей-потомков проявляется в том, что внутренние вход-выходные потоки операций в родительском модуле наследуются модулем-потомком в качестве внешних потоков. Наряду с наследуемыми потомок может иметь и дополнительные внешние потоки, которые не учтены в родительском модуле. Аналогичное справедливо и для целей и факторов, с той особенностью, что наследоваться может только часть родительских целей (факторов), которые распределяются между потомками.

Логика преобразования потоков при реализации операций. Графическое описание потоковой диаграммы A -сценария будем дополнять логическими формулами, отображающими варианты преобразования потоков и ресурсов при срабатывании операции. В общем случае операция может иметь несколько входных и несколько выходных наборов, составленных из символов потоков и ресурсов, образующих различные вход-выходные пары. Особенностью этих пар является то, что входному набору соответствует один и тот же выходной набор. В логической формуле пару будем заключать в скобки, входной набор отделять от выходного стрелкой, при нескольких парах в формуле разделять скобки

знаком дизъюнкции ($\vee$). Диаграмме на рис. 1 соответствуют следующие формулы.

$$A_1: (P_1P_2R_1 \rightarrow P_4P_5P_6P_7R_1) \vee (P_1P_2R_1 \rightarrow P_4P_5P_6P_8R_1);$$

$$A_2: (P_4 \rightarrow P_2);$$

$$A_3: (P_7R_1 \rightarrow P_{10}) \vee (P_9R_1 \rightarrow P_{10});$$

$$A_4: (P_8R_1 \rightarrow P_9R_1);$$

$$A_5: (P_{10} \rightarrow P_3).$$

Обратим внимание на то, что в операциях A_1 и A_4 ресурс R_1 является одновременно входным и выходным. Это соответствует тому, что при выполнении указанных операций запас на складе принимается во внимание, но не расходуется.

Анализ абстрактного сценария СРЭ на основе сетей Петри

Краткие сведения о сетях Петри

Сеть Петри (СП) – это хорошо известная дискретная динамическая модель с наглядным графическим представлением. Классические определения СП – формальные. Однако в аспекте сценарно-логического моделирования СРЭ уместно напомнить и достаточно очевидные содержательные понятия, связанные со структурой, поведением и свойствами СП. Структура СП определена как ориентированный граф с двумя типами вершин – позициями и переходами, изображаемыми соответственно кружками и планками (черточками). Дуги в графе соединяют только вершины разного типа (двудольный граф). В позиции помещаются маркеры, изображаемые жирными точками. Число маркеров в позиции определяет ее состояние, а набор состояний всех позиций – состояние (маркировку) СП. Маркировка позиции и сети в целом является переменной величиной – функцией дискретного времени. Начальная маркировка СП указывается на ее рисунке. Пример структуры СП, заимствованный из [5], дан на рис. 2. Поведение СП определяется изменением ее маркировки, обусловленным срабатыванием переходов. Переход подготовлен для срабатывания (активирован), если в каждой его входной позиции есть по меньшей мере один маркер. При срабатывании перехода, которое происходит за нулевое время, т.е. мгновенно, из каждой его входной позиции удаляется, а в каждую выходную позицию вносится маркер.

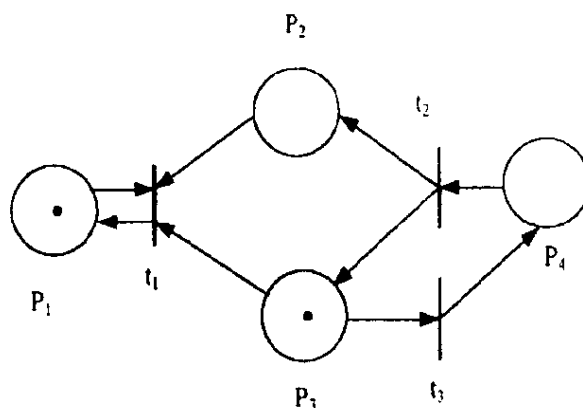


Рис. 2. Пример сети Петри

Анализ СП заключается в распознавании ряда свойств, к которым относятся: 1) Ограниченность (число маркеров в позиции не превышает величины ее емкости k , если $k=1$, то сеть называют безопасной); 2) Сохранение (число циркулирующих в сети маркеров постоянно); 3) Активность (переход называют активным, если в сети отсутствует маркировка, в которой он никогда не может активироваться, т.е. является тупиковым. Различают 5 разных уровней активности переходов); 4) Достижимость и покрываемость (маркировка достижима в СП, если существует цепочка срабатываний переходов, ведущая из начальной в данную маркировку. Маркировка M_1 покрывает маркировку M_2 , если все маркировки позиций в M_1 не меньше соответствующих маркировок в M_2 , но по меньшей мере одна строго больше); 5) Реализуемость последовательности переходов (определить «пройдет» ли в сети заданная последовательность переходов); 6) Эквивалентность (сети эквивалентны, если они имеют одинаковое поведение, определяемое множеством достижимых маркировок или множеством реализуемых последовательностей переходов).

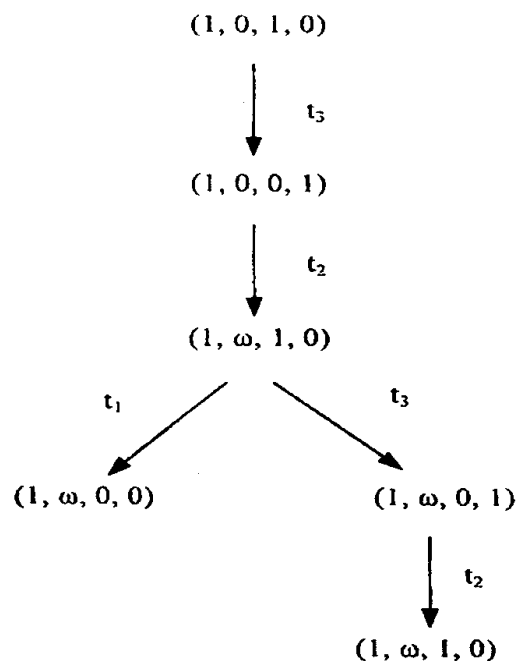


Рис. 3. Дерево достижимости для сети Петри на рис. 2

Для проверки корректности А-сценария СРЭ (поточной диаграммы) анализируются важнейшие свойства СП: ограниченность, отсутствие «тупиковых маркировок», отсутствие «ловушек» - циклов, не имеющих выхода. Анализ СП выполняется на основе дерева достижимости сети Петри (см. рис. 3), алгоритм построения которого описан в [5]. Неограниченность при описании маркировок позиций СП отображается специальным символом « ω », обозначающим бесконечность. Для любого постоянного « c » определены операции над w :

$$w + c = w, \text{ если } c < w;$$

$$w - c = w, \text{ если } w \leq c.$$

Преобразование абстрактного сценария СРЭ в адекватную сеть Петри и коррекция сценария

A-сценарий СРЭ будем считать корректным, если, во-первых, корректны все образующие его сценарные модули, и, во-вторых, модули корректно согласованы. Условия согласованности сценарных модулей обсуждались выше. Что касается проверки корректности модулей, то на уровне *A*-сценария для этой цели, как уже неоднократно говорилось, могут эффективно использоваться сети Петри. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Преобразование сценарного модуля в адекватную СП производится на основе следующей процедуры:

- для каждой операции удаляется входная (выходная) стрелка, и вместо нее внутри рамки операции помещается входная (выходная) позиция, помеченная также, как и удаленная стрелка;
- каждой паре скобок в логической формуле преобразования потоков данной операции сопоставляется переход, также размещаемый внутри рамки операции;
- введенный переход соединяется с входными и выходными позициями согласно логической формуле;
- одинаково помеченные позиции, принадлежащие разным операциям, отождествляются.

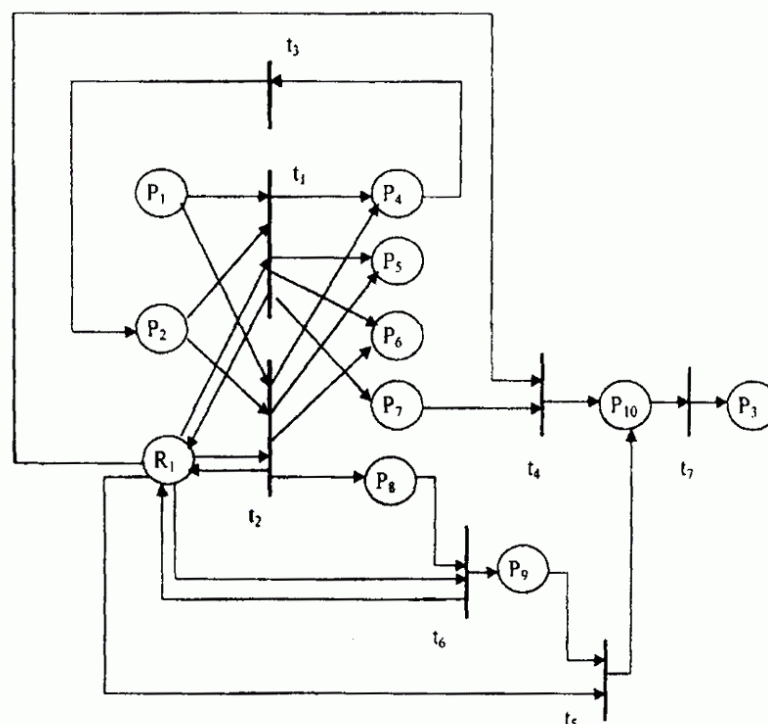


Рис.4. Результат преобразования сценарного модуля A_0 (рис.1)
в модуль сети Петри

Применение рассмотренной процедуры к сценарному модулю A_0 , изображенному на рис. 1, порождает модуль СП, приведенный на рис. 4.

Откорректированный с учетом преобразования в адекватную сеть Петри сценарный модуль верхнего уровня дан на рис. 5.

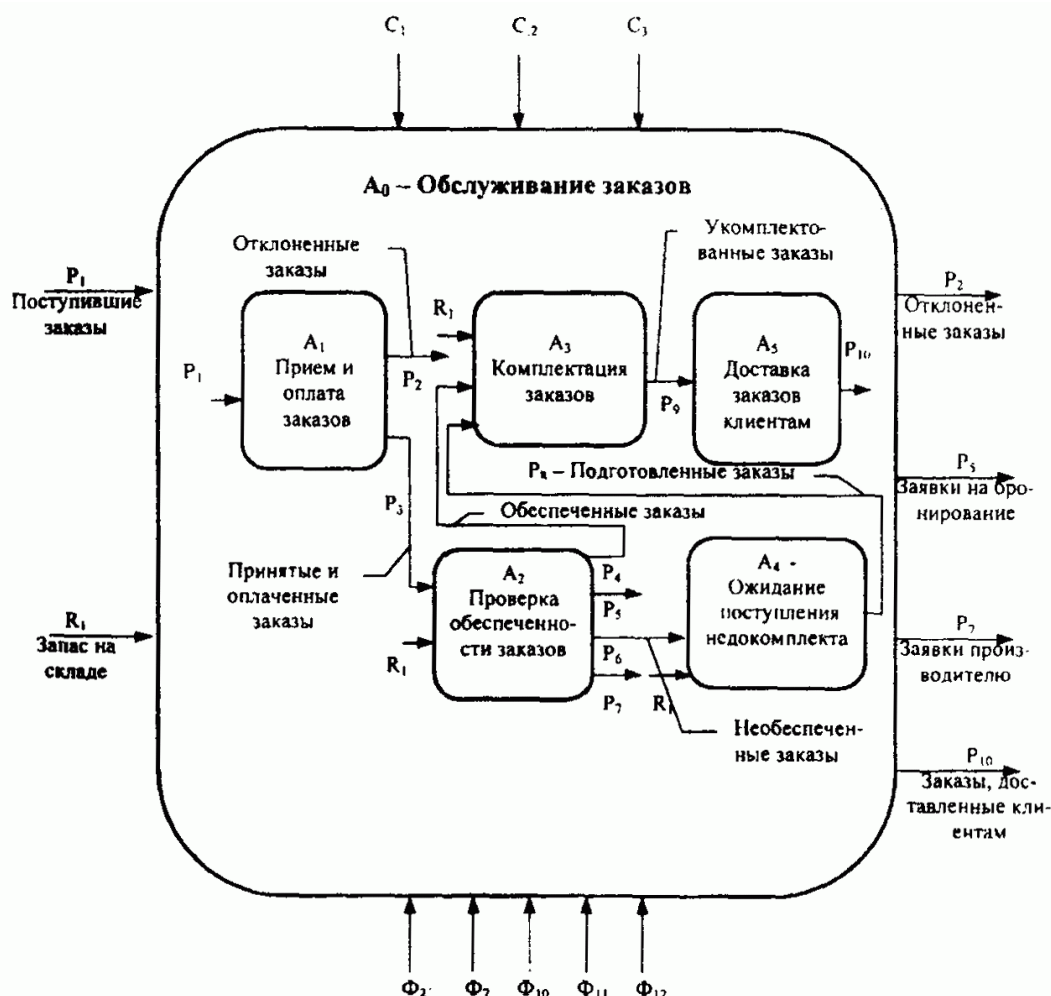


Рис. 5. Откорректированный сценарный модуль верхнего уровня

Формирование и анализ структурного сценария СРЭ

Эволюционно-потокосная диаграмма как модель С-сценария

С-сценарий представляет собой детализацию А-сценария с учетом эволюции мобильных объектов в ходе выполнения операций и передачи объектов от одних операций к другим. Эволюция объектов при выполнении операции проявляется в изменении значений их атрибутов, при переходах между операциями могут возникать «мутации» - порождение новых атрибутов и потеря ставших ненужными. Мутация сопровождается также наследованием определенных атрибутов. Таким образом, понятия эволюции и мутации имеют тот же смысл, что и для живых организмов.

Эволюцию объектов при обработке их конкретной операцией будем трактовать как последовательную смену состояний объектов, определяемую жизненным циклом этой операции. Все объекты, обрабатываемые операцией, имеют одно и то же множество атрибутов, набор значений которых и определяет состояние объекта. Чтобы проследить траекторию каждого объекта,

во множестве атрибутов операций выделяется ключевой атрибут (группа атрибутов). Значения ключевых атрибутов при прохождении объектами операционного жизненного цикла не изменяются.

Помимо эволюционных преобразований объектов операция осуществляет накопление и хранение поступающих на нее (входных) и обработанных ею (выходных) объектов, а также потребление необходимых для ее жизнедеятельности ресурсов. Операция представляет собой комплекс, в котором взаимоувязаны информационные данные и процедуры их обработки. Согласно парадигме объектно-ориентированного подхода [2, 3] операция C -сценария соответствует понятию «класс». Экземплярами класса являются «живущие» в нем объекты. Во взаимодействие между операциями (классами), сопровождаемыми мутациями атрибутов, может быть вовлечено несколько входных и выходных классов. При этом из входного класса в выходные может наследоваться, а в выходном классе порождаться определенное «свое» подмножество атрибутов.

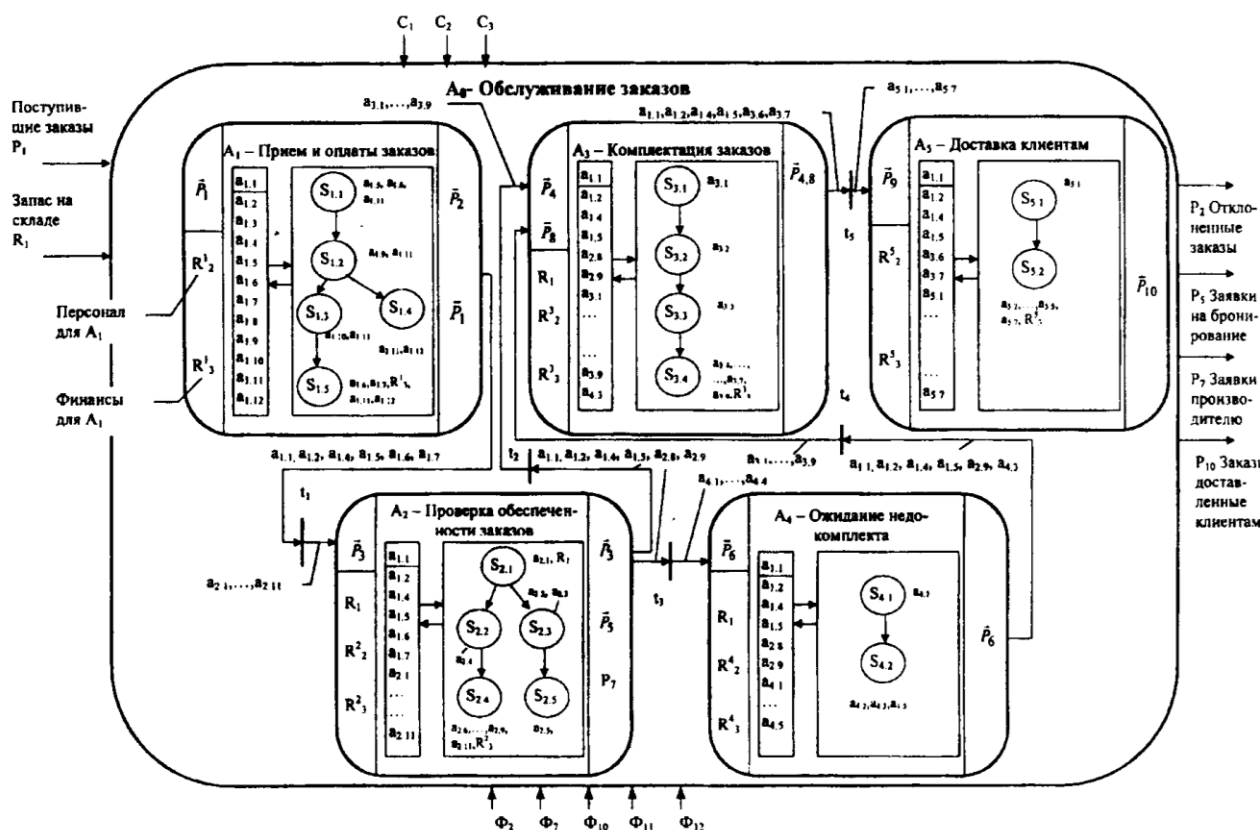


Рис. 6. Эволюционно-потокоская диаграмма для откорректированного А-сценария на рис. 5

Вышеизложенное подводит к тому, чтобы в качестве формальной основы для описания C -сценария СРЭ применить сеть Петри, позиции которой сопоставлены классам, а переходы – межклассовым взаимодействиям. Такое формальное представление C -сценария мы называем эволюционно-потокоской диаграммой – ЭП-диаграммой [12]. Пример ЭП-диаграммы для откорректированного C -сценария СРЭ (рис. 5) дан на рис. 6. Более детальное

описание графического и аналитического аппарата, примененного в ЭП-диаграммах, изложено в [13].

Как видно из ЭП-диаграммы, прохождение каждым объектом (в нашем примере заказом) своего жизненного цикла сопровождается изменением значений неключевых атрибутов в том столбце «внутренней» таблицы класса – протокола его работы во времени, который соответствует данному заказу, а также, возможно, сопровождается изменением состояния ресурсов. Указанные изменения будем называть внутриклассовыми преобразованиями в отличие от межклассовых преобразований, которые связаны с уничтожением («смертью») объектов в одних классах и их созданием («рождением») в других классах. Для каждого объекта характерна определенная «история жизни» в классе, которая описывается последовательностью наборов его атрибутов, привязанной к шкале реального времени. Истории жизни объектов в классах определяются в результате имитационного моделирования С-сценария СРЭ, и могут быть весьма полезны при принятии решений.

Динамическое моделирование СРЭ на основе С-сценария

Более подробно рассмотрим механизм функционирования поведенческой модели СРЭ на основе С-сценария. Каждый класс ЭП-диаграммы (рис. 6) работает автономно. Его взаимодействие с другими классами и внешней средой заключается во внесении во входные очереди новых объектов (ресурсов) и удалении из выходных очередей отработавших объектов. Внутри класса на рис. 6 помещены граф жизненного цикла объектов, где вершинами S_i представлены стадии цикла, а вертикальной таблицей слева от графа – набор атрибутов потока объектов, реализующих цикл. Между графом цикла и таблицей атрибутов осуществляется двустороннее взаимодействие (встречные стрелки).

Механизм работы поведенческой модели на уровне С-сценария проиллюстрируем схемой на рис. 7. Таблица слева от графа жизненного цикла (внутренняя таблица) содержит переменное число столбцов – по количеству объектов, находящихся в данный момент в вершинах графа. Каждому объекту соответствует набор значений атрибутов в своем столбце внутренней таблицы. Объекты, находящиеся во входной очереди класса, адресованы в начальную вершину графа жизненного цикла. Когда в этой вершине появляется свободное место, т.е. число объектов в ней меньше максимального, объект входной очереди, имеющий наибольший номер, удаляется из очереди и вносится во внутреннюю таблицу и начальную вершину графа. Входная очередь сдвигается на шаг вправо, а объект начинает реализацию своего жизненного цикла. Когда этот цикл завершен, соответствующий ему столбец удаляется из внутренней таблицы и вносится в выходную очередь на место с первым номером (если выходных очередей несколько, то выбор очереди определяется значением атрибутов объекта).

При срабатывании внешних переходов, для которых данный класс является родительским, из выходной очереди удаляется объект с наибольшим номером, а во входную очередь класса-потомка на место с номером 1 вносится

новый объект. Таблицы ресурсов взаимодействуют с графом жизненного цикла: в вершинах графа могут выполняться действия, приводящие к расходованию ресурсов, а при критическом снижении уровня ресурсов может блокироваться срабатывание переходов в графе цикла. Человеческий ресурс только блокирует переходы (одностороннее взаимодействие), финансовый ресурс как блокирует переходы, так и расходуется при выполнении жизненного цикла объектов или/и удалении объектов из выходной очереди (двустороннее взаимодействие).

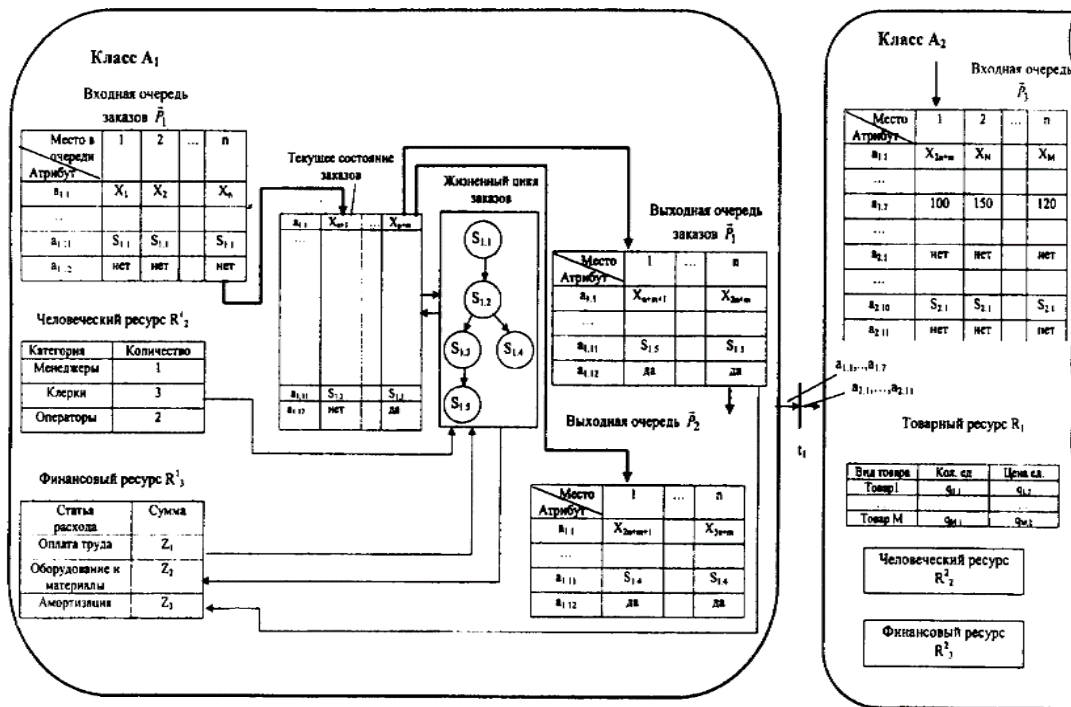


Рис. 7. Механизм функционирования модели, реализующей С-сценарий

Представление результатов моделирования С-сценария в виде конвейерно-временной диаграммы

Каждый объект в классе проходит через три фазы:

- 1) ожидает во входной очереди;
- 2) реализует жизненный цикл;
- 3) ожидает в выходной очереди.

Далее объект в данном классе уничтожается, но передает в класс-потомок атрибут-идентификатор и, возможно, некоторые другие наследуемые атрибуты. Цепочку объектов из разных классов с общим идентификатором называют метаобъектом [13]. Метаобъект проходит через систему по определенному маршруту, характеризуемому фазами пребывания объектов в классах и межклассовыми переходами. Метаобъекты запускаются в систему последовательно, один за другим, в так называемом параллельно-конвейерном режиме. Одновременно могут проходить свои маршруты несколько метаобъектов. Зависимость от времени изменений характеристик СРЭ при параллельно-конвейерной работе метаобъектов описывается конвейерно-временными диаграммами (КВД) [10, 11, 13].

Пример КВД дан на рис. 8. Она состоит из графика в системе координат «время – характеристика СРЭ» и набора так называемых метаобъектных шкал, размещенным ниже графика параллельно оси времени. Каждая такая шкала соответствует маршруту одного метаобъекта. На ней кружками показываются граничные точки - моменты изменения фазы метаобъекта внутри классов и его перехода из класса в класс. Кружки тех граничных точек, в которых происходит изменение моделируемой характеристики СРЭ, зачерняются.

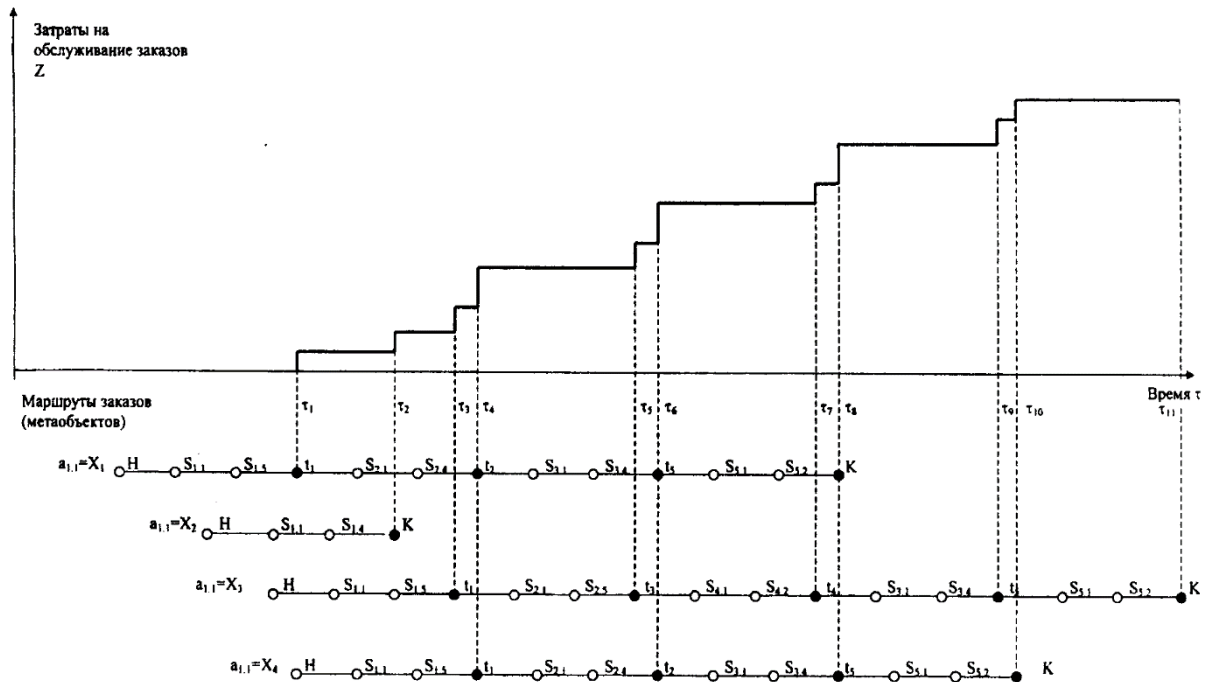


Рис. 8. Пример конвейерно-временной диаграммы для С-сценария на рис. 6

Начальная и конечная точки шкалы обозначаются соответственно H и K . Точки перехода метаобъектов из входной очереди на граф жизненного цикла обозначаются символом начальной вершины этого графа, а точки перехода из конечной вершины графа в выходную очередь – символом конечной вершины. Точки перехода метаобъекта из класса в класс обозначаются также как в C -сценарии, т.е. через t_i . Слева шкала помечается идентификатором соответствующего метаобъекта. Зачерненные граничные точки метаобъектных шкал проецируются на временную ось графика $Z=f(\tau)$ в виде моментов $\tau_1, \dots, \tau_n$. Значения ординат графика в моменты τ_i , $i=1, \dots, n$, определяются в ходе имитационного моделирования C -сценария как значения соответствующих атрибутов. В момент τ_i значение ординаты графика может формироваться как результат воздействия нескольких параллельно работающих метаобъектов. В этом случае изменения характеристики СРЭ, инициируемые разными метаобъектами, суммируются. На интервалах между моментами, нанесенными на ось времени, значение функции Z не изменяется – график КВД представляет ступенчато возрастающую функцию.

Заключение

В заключение отметим пять характерных аспектов предлагаемой методологии логического моделирования поведения Систем Рыночной Экономики.

1. *Сценарный подход.* Существуют две противоречащие друг другу трактовки понятия «сценарий» и его связи с понятием «архитектура или реализация». Согласно первой трактовке, имеющих сторонников в технических и некоторых гуманитарных науках, сценарий определяется как способ функционирования системы с известной архитектурой, т.е. уже существующей системы, задающий очередность выполнения отдельных работ, диктуемых архитектурой. Иными словами, архитектура системы первична, сценарий вторичен. В сфере искусства (театр, кино, живопись, музыка и т.д.), да и в современной естественной науке, сценарий – это всего лишь эскиз (прообраз) новой системы, в которой много неясного и неопределенного, об архитектуре, а тем более о реализации, говорить еще рано. При второй трактовке (сценарий первичен, архитектура системы вторична) сценарий играет роль модели, разработка и исследование которой позволяет получить более полные полезные знания о создаваемой системе. Под таким углом зрения, по мнению автора, следует трактовать изложенный в работе «сценарный подход».

2. *Моделирование сценария проводится на абстрактном и структурном уровне. Интеграция процессо- и объектно-ориентированных подходов.* Моделирование поведения систем рыночной экономики проводится на двух уровнях – рамочном и детальном. Рамочный уровень соответствует абстрактному сценарию, детальный уровень – структурному. Абстрактный уровень дает самую общую картину поведения системы – отображает операции по достижению целей и потоки (материальные, информационные, финансовые), циркулирующие между системой и средой и внутри системы. Он соответствует стилю мышления специалистов в предметной области, т.е. процессо-ориентированному подходу. С другой стороны, он позволяет аналитически проверить корректность предварительных представлений специалистов о поведении моделируемой системы. В результате могут быть выявлены и исправлены ошибки, обнаружение которых на уровне детального сценария представляло бы гораздо более сложную проблему.

На втором уровне моделирования абстрактный сценарий преобразуется в структурный – детальное объектно-ориентированное описание движения в системе структурированных элементов потоков (объектов и ресурсов). Структурный сценарий трансформируется в программу, на основе которой проводится имитационное моделирование СРЭ. Двухуровневое моделирование сценария позволяет упростить процедуру анализа поведения системы, а также взаимно дополнить процессо-ориентированный и объектно-ориентированный подходы к ее проектированию.

3. *Применение формального аппарата сетей Петри для проверки корректности абстрактного сценария.* Аппарат сетей Петри позволяет адекватно отобразить динамику сложных систем, в том числе выполнение параллельных процессов. Однако методы моделирования на сетях Петри

достаточно трудоемки, а форма представления результатов (в виде дерева достижимости маркировок) громоздка и ненаглядна. Для упрощения процедуры анализа сети Петри был предложен алгоритм ее редукции, позволяющий без искажения поведения моделируемой системы «вырезать» из сети заведомо корректные фрагменты, а для остаточной части сети сформировать так называемую «ленту достижимости», отличающуюся компактностью и наглядностью [6, 13, 14]. На ее основе анализируется конфигурация *A*-сценария – проверяется отсутствие в нем «зависаний», циклов-ловушек, переполнений позиций, а также выполняет ли сценарий требуемые функции.

4. Моделирование структурного сценария: эволюция объектов при реализации ими жизненного цикла внутри классов и наследование/порождение признаков при взаимодействиях между классами. При преобразовании абстрактного сценария в структурный операции сопоставляются с классами. Класс условно можно представить как некоторый «мир», в котором обитают объекты с одинаковым набором признаков (атрибутов), различающиеся лишь значениями этих признаков. Объекты порождаются в классе и накапливаются во входной очереди на реализацию жизненного цикла. После прохождения жизненного цикла, сопровождаемого изменением значений признаков, объекты накапливаются в выходной очереди – на уничтожение. Жизнедеятельность процессов в классе обеспечивается потреблением ресурсов.

При наступлении события, определяемого ситуацией в данном классе-родителе и классе-потомке, объект в родительском классе удаляется из выходной очереди и уничтожается, а во входной очереди потомка порождается новый объект. Порожденный объект может наследовать некоторые признаки уничтоженного, но обязательно содержит новые признаки. Таким образом, имеет место явление, схожее с мутацией клеток при эволюции живых организмов. При имитационном моделировании структурного сценария определяются эволюционные изменения в объектах внутри классов, изменения наследуемых признаков при их миграции из класса в класс, а также статистические данные по отдельным классам и системе в целом. Результаты имитационного моделирования структурного сценария наглядно отображаются описанными выше конвейерно-временными диаграммами. Изложенное описание структурного сценария и механизма его моделирования подтверждает концепцию С. Бира [1] об аналогии между системами рыночной экономики и биологическими системами.

5. Локальное моделирование иерархических сценариев. Моделирование сложных иерархических сценариев может быть организовано как глобальная либо локальная процедура. В первом случае вначале итеративно создается полная иерархическая модель системы и лишь затем осуществляются имитационные эксперименты над ней. Во втором случае ведется последовательное послойное моделирование путем построения и анализа цепочки локальных моделей. Локальная модель каждого уровня (слоя) является достаточной в смысле возможности ее имитационного «прогона» и в тоже время прозрачной для пользователя и удобной для принятия решений на ее

основе. Навигация по локальным моделям производится как сверху вниз, так и снизу вверх. Локальное моделирование является, по нашему мнению, эффективным средством преодоления сложности, т.к. работать с несколькими простыми моделями легче, чем с одной сложной.

Литература

1. Бир С. Мозг фирмы: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993.
2. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++, – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: изд. Бином, СПб: Невский диалект, 1998.
3. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML / Руководство пользователя: Пер. с англ. – М.: ДМК, 2000.
4. Котов В. Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984.
5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
6. Таль А. А., Юдицкий С. А. Иерархия и параллелизм в сетях Петри // Автоматика и телемеханика. 1982. №7, №9.
7. Юдицкий С. А., Магергут В. З. Логическое управление дискретными процессами. – М.: Машиностроение, 1987.
8. Юдицкий С. А., Барон Ю. Л., Бишеле И. В. Схемно-ориентированная технология логического моделирования // Приборы и системы управления. 1996. №8.
9. Юдицкий С. А. Целевое моделирование организационных систем // Приборы и системы управления. 1999. №12.
10. Юдицкий С. А. Технология целевого моделирования бизнес-систем // Приборы и системы управления. 2000. №10.
11. Юдицкий С. А. Сценарно-целевой подход к системному анализу // Автоматика и телемеханика. 2001. №4.
12. Юдицкий С. А. Эволюция объектов в потоковой модели бизнес-систем. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. №11.
13. Юдицкий С. А. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. – М.: СИНТЕГ, 2001.
14. Юдицкий С. А., Владиславлев П. Н. Основы предпроектного анализа организационных систем: Учеб. Пособие. – М.: Финансы и статистика, 2005.

References

1. Beer Stafford. *Brain of the firm: the managerial cybernetics of organization*. New York: J. Wiley, 1981.
2. Booch Grady. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. 2-nd ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1998.
3. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. *The Unified Modeling Language*. *Unix Review*, 1996.
4. Kotov V. E. *Seti Petri [Petri Nets]*. Moscow, Nauka, 1984 (in Russian).
5. Peterson J. L. *Petri Net Theory And The Modeling Of Systems*, 1981.

6. Tal' A. A., Iuditskii S. A. Hierarch and Parallelism Petri Nets. *Automation and Remote Control*, no. 7, no. 9, 1982 (in Russian).
7. Iuditskii S. A., Magergut V. Z. *Logicheskoe upravlenie diskretnymi protsessami* [Logical Control of Discrete Processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987 (in Russian).
8. Iuditskii S. A., Baron Iu. L., Bishele I. V. Skhemno-orientirovannaia tekhnologiya logicheskogo modelirovaniia [Circuit-Oriented Logic Simulation Technology]. *Pribory i sistemy upravleniia*, 1996, no. 8 (in Russian).
9. Iuditskii S. A. Tselevoe modelirovanie organizatsionnykh system [Target Modeling Organizational Systems]. *Pribory i sistemy upravleniia*, 1999, no. 12 (in Russian).
10. Iuditskii S. A. Tekhnologiya tselevogo modelirovaniia biznes-sistem [Technology the Task of Modeling Business Systems]. *Pribory i sistemy upravleniia*, 2000, no. 10 (in Russian).
11. Iuditskii S. A. Stsenarno-tselevoi podkhod k sistemnomu analizu [Scenary-Oriented Approach to System Analysis]. *Automation and Remote Control*, 2001, no. 4 (in Russian).
12. Iuditskii S. A. Evoliutsiia ob"ektov v potokovoi modeli biznes-sistem [Evolution of Objects in the Stream Model Business Systems]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2001, no. 11 (in Russian).
13. Iuditskii S. A. *Stsenarnyi podkhod k modelirovaniu povedeniia biznes-sistem* [Scenary Approach to Modelling for Business Systems]. Moscow, Sinteg Publ., 2001 (in Russian).
14. Iuditskii S. A., Vladislavlev P. N. *Osnovy predproektnogo analiza organizatsionnykh system* [The Basics of Pre-Analysis of Organizational Systems]. Moscow, Finansy i Statistika Publ., 2005 (in Russian).

Статья поступила 20 июля 2015 г.

Информация об авторах

Юдицкий Семен Абрамович - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. Область научных интересов: моделирование организационно-технических систем. Тел. +7 495 339 59 10. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Адрес: Россия, 117997, Москва ул. Профсоюзная, д. 65.

The Scenary Approach to the Logical Modeling of Systems of a Market Economy

Iuditskii S. A.

Statement of the problem. Methodology a two-level scenary approach proposed for logic simulation of the behavior of the market economy. **Methods:** framework (abstract) scenary builds on the first

(top) level. This script is oriented to specialists in the subject area. On the basis of the framework (abstract) script checks the correctness of the source of knowledge about the behavior of systems of a market economy (with filtering of the relevant errors). On the second (bottom) level of the framework, the script is converted into a detailed object-oriented description of a structural scenary in which simulation is the modeling of the behavior of the market economy.

Key words: abstract scenary, structural scenary, factor-target analysis, situation scenary, dynamic simulation, stream diagram, Petri net, the life cycle of objects, attainability aim modeling, conveyor-time diagram

Information about Author

Iuditskii Semen Abramovich - Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor, Senior Research Officer of Institute of Control Sciences RAS. Field of research: modeling of organizational and technical systems. Tel.:+7 495 339 59 10. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Address: Russia, 117997, Moscow, Profsoyuznaya str., 65.

УДК 621.391

Методы проектирования телекоммуникационных информационно–управляющих систем аудиообмена в сложной помеховой обстановке

Кропотов Ю. А., Белов А. А., Проскуряков А. Ю., Колпаков А. А.

Постановка задачи: передача информации речевыми сообщениями является эффективным средством обеспечения оперативного управления, обеспечения надежного функционирования сложных объектов, что повышает требования к характеристикам информационно-управляющих систем аудиообмена, функционирующих в условиях сложной помеховой обстановки. **Используемые методы:** в исследованиях применялись методы параметрической оптимизации, локальной аппроксимации, идентификации и адаптивной компенсации. **Результат:** в работе проведено исследование и разработка методов и теоретических подходов к созданию алгоритмов обработки речевых сигналов, повышающих эффективность функционирования информационно-управляющих телекоммуникационных систем аудиообмена при воздействии внешних акустических помех высокой интенсивности.

Разработан алгоритм гистограммного оценивания экспериментальной функции плотности вероятности оцифрованного речевого сигнала. Показана зависимость точности оценивания функции плотности вероятности от времени анализа. Так, для вычисления по этому алгоритму функции плотности вероятности с погрешностью менее 5 % требуется время анализа 0,3 с, для вычислений с погрешностью менее 1 % требуется время анализа 4,5 с.

По сравнению с известными способами восстановления плотности вероятности речевого сигнала, имеющими значительную погрешность восстановления, рассмотренные алгоритмы имеют большую точность. Наиболее предпочтительным по критериям максимальной точности и минимальной вычислительной сложности является алгоритм, основанный на аппроксимации гистограммы многочленом по системе экспоненциальных функций.

Разработанный алгоритм гистограммной оценки экспериментальной функции одномерного закона распределения плотности вероятности речевых сигналов и рекуррентный алгоритм определения параметров многочлена аппроксимации по системе экспоненциальных функций обеспечивает погрешность восстановления вышеуказанной функции распределения плотности вероятности менее 5%, при использовании в аппроксимирующей функции многочлена третьего порядка.

Математическая модель функции распределения плотности вероятности сигналов внешних акустических шумовых помех, полученная с помощью алгоритма гистограммной оценки и рекуррентного алгоритма вычисления параметров, представляется рядом гауссовых кривых третьего порядка. Погрешность восстановления одномерной функции распределения плотности вероятности внешних акустических шумов достигается менее 4,8 %.

Исследования различных аппроксимаций спектральной плотности мощности речевого сигнала и акустических шумовых помех показали, что аппроксимации интерполяционным многочленом Лагранжа или кубическим сплайном имеют практически одну и ту же погрешность, при аппроксимации спектральной функции полиномом Лагранжа 11-го порядка получают погрешность 3,39%...4,82%.

Сравнительные исследования спектральных характеристик речевых сигналов и акустических помех показали, что спектр акустических помех относительно спектра речевых сигналов смещен в низкочастотную часть звукового диапазона и находится в пределах 0...1000 Гц. Так, спектр шума моря сосредоточен в области от 0 до 500 Гц, спектр шума ветра сосредоточен в пределах от 0 до 300 Гц и спектр шума в машинном отделении или спектр шума в кабине пилота самолета сосредоточен в пределах от 0 до 1200 Гц.

Проведенные исследования позволили обосновать создание более эффективных диспетчерско-технологических систем телекоммуникаций, систем громкоговорящей связи обмена речевыми сообщениями в условиях сложной помеховой обстановки. Разработаны методы построения моделей сигналов и моделей алгоритмов обработки, разработаны методы определения параметров систем передачи и обмена речевыми сообщениями, разработаны более эффективные алгоритмы подавления внешних акустических шумов и помех, разработаны более

быстродействующие алгоритмы компенсации эхо-сигналов. Решены вопросы повышения эффективности передачи информации речевыми сообщениями в распределенных оперативно-командных телекоммуникационных системах на многофункциональных объектах, работающих в условиях воздействия помех интенсивностью до 90 дБ. Представлены разработанные структуры устройств подавления внешних акустических помех и устройств адаптивных эхокомпенсаторов, позволяющие получить на выходе системы аудио обмена отношение сигнал/помеха более 20 дБ и, соответственно, обеспечить слоговую разборчивость речевых сообщений более 93%.

Ключевые слова: алгоритмы обработки, информационно-управляющая телекоммуникационная система аудиообмена, адаптивная компенсация, локальная аппроксимация.

Введение

Современный этап развития диспетчерско-технологических оперативно-командных систем телекоммуникаций характеризуется существенной интеграцией и повышением их функциональной насыщенности, характеризуется переходом на новые информационные технологии. Современные диспетчерско-технологические системы телекоммуникаций, в том числе оперативно-командные системы громкоговорящей связи (ГГС) получили все более широкое применение на многофункциональных объектах, в системах массового обслуживания. Современные системы телекоммуникаций имеют сетевую распределенную структуру в виде многоканальной системы передачи цифровой информации с увеличенной пропускной способностью сетей с применением высокоскоростных технологий Ethernet или ISDN, вследствие требований на значительное число абонентских постов обмена.

В настоящее время такие системы представляют собой объект активных теоретических исследований. Исследователи, используя новый технологический уровень, обратились к созданию моделей алгоритмов высоких порядков, которые в условиях развития микроэлектроники стали практически реализуемыми. Вопросам разработки теоретических основ создания систем телекоммуникаций передачи речевой информации посвящено достаточно много трудов известных авторов: Сапожков М.А. [1], Фланаган Дж. Л. [2], Рабинер Л.Р., Гоулд Б. [3], Назаров М.В., Прохоров Ю.Н. [4]

Решение многих из приведенных вопросов основано на методах оптимизации, рассмотренных в работах Граничина О.Н., Поляка Б.Т. [5], Нестерова Ю.Е. [6] и др.

С их помощью решаются задачи параметрического анализа, синтеза и интеграции систем. Разработанные в работах Катковника В.Я. [7] теории позволяют решать задачи локальной аппроксимации и сглаживания сигналов. Предложенные ими методы делают возможным получение решений при самых общих функциональных ограничениях, налагаемых на сигналы и помехи.

Информационно - управляющие телекоммуникационные системы аудиообмена

Структурная схема цифрового абонентского устройства современной оперативно-командной телекоммуникационной системы обмена аудиокомандной, телеметрической и другой информацией имеет вид, представленный на рис. 1.

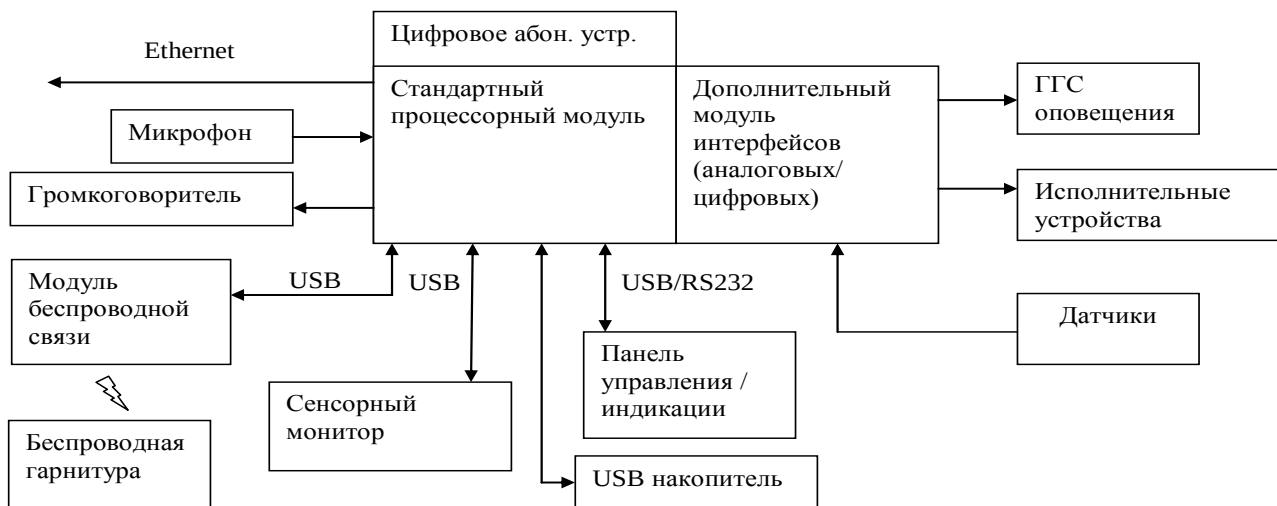


Рис. 1. Структурная схема цифрового абонентского устройства современной оперативно-командной системы телекоммуникаций

В процессорном модуле абонентского устройства может применяться встраиваемый одноплатный компьютер. Периферийные устройства могут подключаться по скоростным каналам и шинам расширения. Каналы Gigabit Ethernet позволяют использовать данное абонентское устройство через микропроцессорный стык абонентского доступа в развитой сетевой инфраструктуре системы телекоммуникаций. Каждое абонентское устройство с микрофонным входом должно быть оборудовано системами обработки сигналов [8].

В работе рассмотрены новые модели речевых сигналов и помех, с учетом ограничений в оперативно-командной связи, в распределенных телекоммуникационных системах на многофункциональных объектах (например, на военных кораблях), исследуются одномерные плотности вероятности, корреляционные и спектральные характеристики [9, 10, 11, 12].

Показано, что одной из адекватных характеристик речевого сигнала является функция плотности вероятности, которая может оцениваться путем построения гистограммы по большому числу данных. Представлен разработанный алгоритм построения гистограммы функции плотности вероятности по конечному числу n -разрядных оцифрованных отсчетов в следующем виде [13, 14, 15]:

$$P(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=-2^n+1}^{2^n-1} \sum_{i=1}^N \delta_{x_{ij}}, \quad (1)$$

где $P(x_i)$ – оценка вероятности выборки x_i ,

x_i – i -я выборка, представленная номером уровня квантования,

$x_i \in [-2^n + 1, 2^n - 1]$, $|x_{i,\max}| = 2^n - 1$,

i – номер выборки в анализируемом интервале ($i = 1, 2, \dots, N$),

j – номер интервала гистограммы для анализа числа попаданий в него

x_i - тых выборок, $j \in [-2^n + 1, 2^n - 1]$,

δ_{ij} – символ Кронекера, имеющий вид

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = j, \\ 0, & \text{если } x_i \neq j. \end{cases}$$

Рассмотрено восстановление плотности вероятности речевого сигнала по эмпирическим данным. Исследуются различные аппроксимации функции плотности вероятности. В случае алгебраических и тригонометрических многочленов, описываемых выражениями:

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^M a_k x^{M-k}, \quad (2)$$

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^M (a_k \cos(k\alpha x) + b_k \sin(k\alpha x)), \quad (3)$$

задача аппроксимации заключается в нахождении их коэффициентов [14]. Если параметр α является известным, то задача нахождения коэффициентов многочленов (2) и (3) относится к задаче линейной регрессии точечного метода наименьших квадратов (МНК), 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

$$Q(\theta) = \sum_{k=0}^M (\bar{f}(x_k, \theta) - P(x_k))^2,$$

где $\bar{f}(x_k, \theta)$ – усредненная на k -ом интервале гистограммы оценка функции плотности вероятности $f(x, \theta)$, а θ – вектор параметров, по которым осуществляется минимизация невязки, точнее, вектор коэффициентов p_k , a_k и b_k , от которых многочлены зависят линейно.

Аналогичный вид невязки имеют и при аппроксимации гистограмм многочленами по системам гауссовых и экспоненциальных функций. При этом указанные многочлены описываются выражениями

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{(x)^2}{B_k}}, \quad (4)$$

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{|x|}{B_k}}. \quad (5)$$

В этом случае задача минимизации невязки относится к задачам нелинейной регрессии, к задаче идентификации параметров A_k и B_k методом точечного МНК [16].

Негладкую функцию плотности вероятности можно с помощью метода локальной аппроксимации представить последовательностью многочленов вида (4)–(5), 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 [10, 17]

$$Q_l(\theta) = \sum_{k=0}^M w(x_k - v_l) (\bar{f}(x_k, \theta) - P(x_k))^2,$$

где $w(x)$ – весовая функция, определяющая окно используемых данных, и v_l – величина сдвига окна данных для l -интервала аппроксимации, $l=1, \dots, L$. Полученная таким способом последовательность параметров $\theta_l = \arg \min_{\theta} Q_l(\theta)$ решает задачу аппроксимации.

Зависимости погрешности аппроксимации гистограммы речевого сигнала от порядка многочленов (2)–(5) приведены на рис. 2. Зависимости вычислительных затрат на аппроксимацию гистограммы речевого сигнала от порядка многочленов для рассмотренных выше случаев приведены на рис. 3.

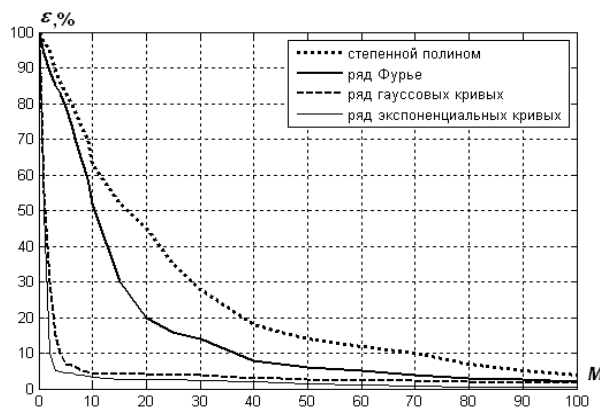


Рис. 2. Зависимости погрешности аппроксимации от порядка M

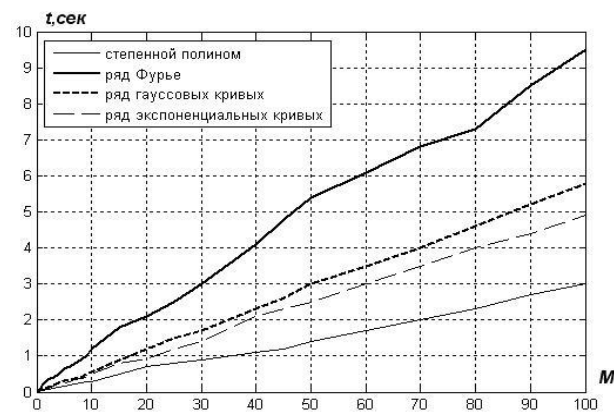


Рис. 3. Вычислительные затраты аппроксимации гистограммы речи

Таким образом, с учетом вышесказанного, для заданной погрешности аппроксимации $\varepsilon \leq 5\%$ и при выполнении условия минимизации вычислительных затрат можно отдать предпочтение аппроксимации функции плотности вероятности речевых сигналов многочленом третьего порядка по системе экспоненциальных функций. Предложен рекуррентный алгоритм вычисления параметров экспонент A_k , B_k для вышеуказанной аппроксимации функции плотности вероятности [18].

По такому же алгоритму (1) исследуется функция плотности вероятности сигналов акустических помех. Показано, что аппроксимация этой функции многочленом третьего порядка по системе функций гауссовых кривых дает погрешность $\varepsilon \leq 4,8\%$ [19].

Исследования спектральных функций речевых сигналов и акустических помех проводились с помощью трех различных алгоритмов с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) на конечных интервалах. В частности, показано, что информацию о форме спектра речевых сигналов можно получить с помощью следующих алгоритмов [20]:

1) Построение формы спектральной плотности по максимальным значениям модулей спектральных составляющих множества кратковременных ДПФ в соответствии с выражением

$$S_{\max}(l \cdot \Delta f_l) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=1}^M |S_m(l \cdot \Delta f_l)| \cdot k_{lm},$$

где $\Delta f_l = \frac{F_0}{L}$, k_{lm} – единичная функция для l -ой дискретной частотной составляющей m -ой кратковременной спектральной плотности, k_{lm} подчиняется условиям

$$k_{lm} = \begin{cases} 1, & |s_m(l \cdot \Delta f_l)| > |s_{m \pm i}(l \cdot \Delta f_l)|, \\ 0, & |s_{m \pm i}(l \cdot \Delta f_l)| \geq |s_m(l \cdot \Delta f_l)|, \end{cases}$$

M – число интегрированных кратковременных ДПФ, $i = 1, 2, \dots, M$.

2) Построение формы спектральной плотности по средним значениям модулей спектральных составляющих кратковременных ДПФ

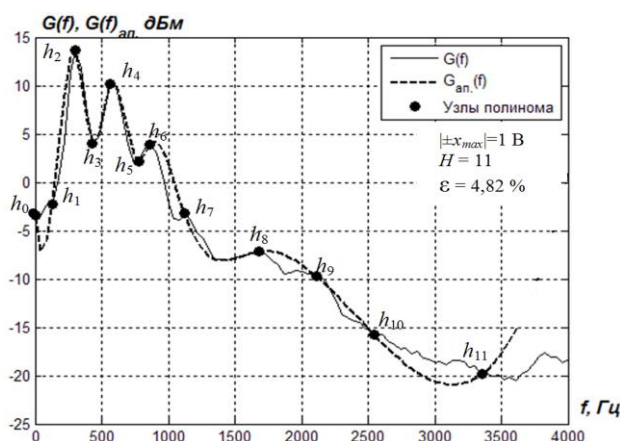
$$S_{cp}(l \cdot f_l) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} |S_m(l \cdot \Delta f_l)|.$$

3) Спектральную функцию распределения плотности мощности по частоте получаем применением ДПФ от интегрированной автокорреляционной функции (АКФ) $R_M(kT)$ на конечном интервале из N отсчетов в виде дискретных отсчетов на частоте $\omega_l = 2\pi \frac{F_0}{N} \cdot l$.

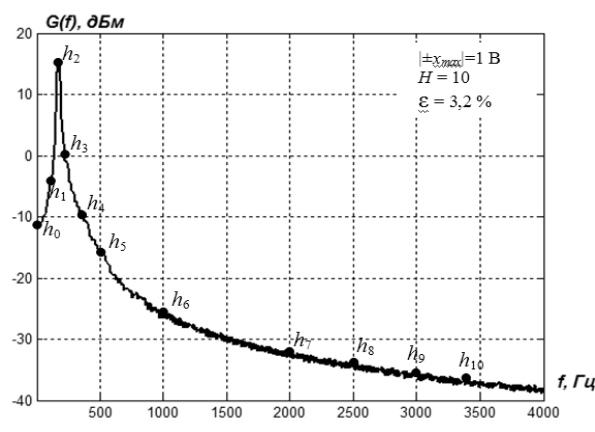
Выражение спектральной функции имеет вид

$$G(\omega_l) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} R_M(kT) e^{-j\omega_l kT}.$$

Исследования спектральных характеристик различных акустических помех осуществлялись так же преобразованием кратковременного ДПФ от АКФ акустических шумов, то есть по выражению $G_{\Pi}(l \cdot f_l) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} R_{\Pi}(kT) e^{-j2\pi l f_l kT}$, где $R_{\Pi}(kT)$ – АКФ акустической помехи на конечном интервале.



а.



б.

Рис. 4. Аппроксимация спектральной плотности интерполяционным многочленом Лагранжа и спектральные функции плотности мощности акустического шума

На рис. 4 видно, что при значениях порядка многочлена $H=10\div 11$ достигается погрешность аппроксимации $\varepsilon < 4,9\%$.

В работе исследуются параметры систем аудиообмена, влияющих на эффективность передачи информации речевыми сигналами. В частности, исследуется влияние отношения сигнал/помеха на слоговую разборчивость с помощью инструментально-расчетного метода. Результаты исследований зависимости слоговой разборчивости от отношения сигнал/шум представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что слоговая разборчивость будет удовлетворять требованию $S \geq 93\%$ при отношении сигнал/помеха $P_c/P_{ак. пом.} \geq 20$ дБ.

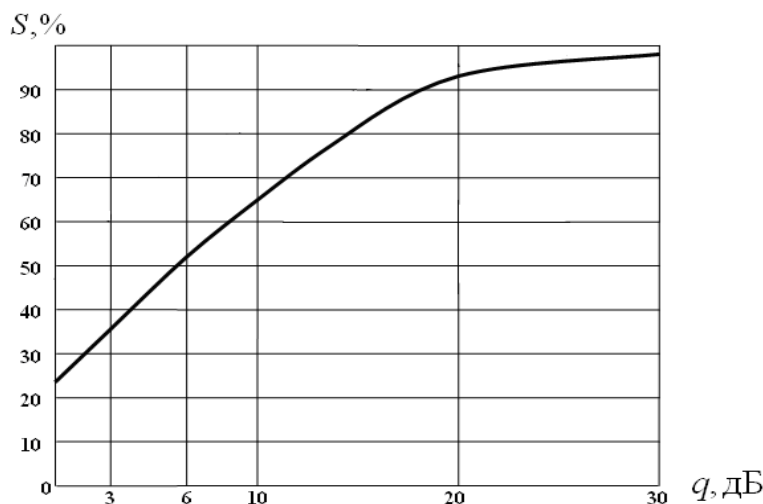


Рис. 5. График зависимости значения слоговой разборчивости от отношения сигнал/ак. пом. – q

Также проведены исследования относительных интенсивностей для различных сигналов и акустических помех по методике вычисления отношения интенсивностей звукового давления I относительно нулевого уровня интенсивности $I_0=10^{-12}$ Вт/м² по значениям дисперсий сигналов и помех. Относительные значения звукового давления определяются по выражению $\frac{I}{I_0}$ (дБ) = $10 \lg \frac{k\sigma^2}{S_{сф} \cdot I_0}$, где $S_{сф} = 4\pi R^2$ – площадь сферы, для случая речевого сигнала $k=2$, $R=1$ м; для случая акустической помехи $k=1$, $R=5$ м.

Полученные значения относительных интенсивностей и соответствующие отношения сигнал/шум для различных акустических сигналов представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что при наличии таких акустических помех как шум моря, шум ветра, шум в машинном отделении, $P_c/P_{ак. пом.}$ находится в пределах $10,5\div 12,6$ дБ. При таких отношениях сигнал/помеха слоговая разборчивость составляет $S \approx 65\%$ (см. рис. 5). В этом случае передача информации речевыми сигналами системой телекоммуникаций без обработки по повышению отношения сигнал/шум будет существенно затруднена и сообщения абонентом будут восприниматься с затруднениями [21].

Таблица 1 – Относительные интенсивности и отношения сигнал/шум

Вид сигнала	σ^2 (Вт)	$\frac{I}{I_0}$ (дБ)	$\frac{P_c}{P_{ак.пом.}}$ (дБ)
Речевой сигнал	0,126	103	—
Шум квантования	$0,5 \cdot 10^{-5}$	59	44
Акустические помехи (ОСТ В4 Г0.005.004)	$3,5 \cdot 10^{-4}$	85	18
Шум моря	0,0687	90,4	12,6
Шум ветра	0,0953	91,8	11,2
Шум в машинном отделении	0,111	92,5	10,5

На рис. 7 представлены результаты моделирования фильтра с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) прямоугольной формы при воздействии на него различных акустических шумовых помех. На рис. 7 проиллюстрировано влияние частоты среза фильтра F_n на отношение $P_c / P_{ак.пом.}$, соответственно на значение величины подавления акустических шумовых помех так как увеличение отношения $P_c / P_{ак.пом.} = \frac{1}{K}$, где $K = \frac{P_{ак.пом.}}{P_{ак.пом.вх.}}$.

Из графиков на рис. 7 видно, что акустические помехи вида «шум ветра», если установить $F_n = 500$ Гц, подавляются на $-(17 \div 23)$ дБ, что увеличивает отношение сигнал/помеха в соответствии с табл. 6.1 до $28,2 \div 34,2$ дБ. Из этих же графиков видно, что при воздействии акустической помехи вида «шум в машинном отделении» и при $F_n = 700-1000$ Гц, такая акустическая помеха подавляется на 12 дБ, что увеличивает результирующее отношение сигнал/помеха до 22,5 дБ. При воздействии акустической помехи вида «шум моря» при $F_n = 800-1000$ Гц данная помеха подавляется на $(11 \div 15)$ дБ, что увеличивает результирующее отношение сигнал/шум до $23,6 \div 27,6$ дБ.

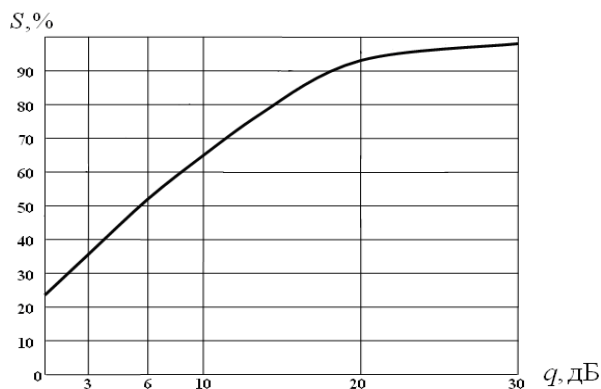


Рис. 6. График зависимости значения слоговой разборчивости от отношения сигнал/ак. пом. – q

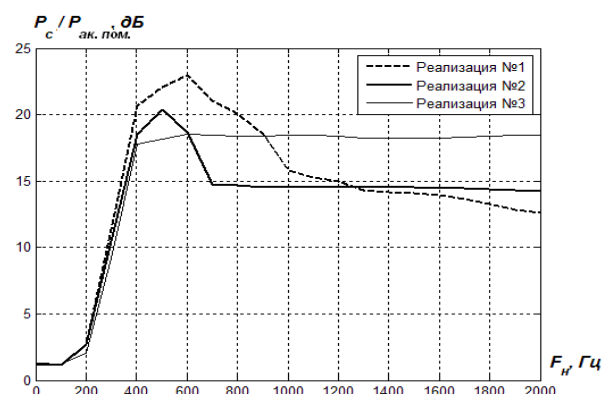


Рис. 7. Зависимость отношения $P_c / P_{ак.пом.}$ на выходе фильтра прямоугольной формы от значения F_n , при фиксированном значении $F_6 = 6000$ Гц

На основании исследования, представленного на рис. 7, разработаны рекомендации по созданию многоканального адаптивного алгоритма

подавления акустических шумов и сосредоточенных помех (рис. 8), с применением гребенки узкополосных фильтров с формантным распределением полос режекции [22, 23].

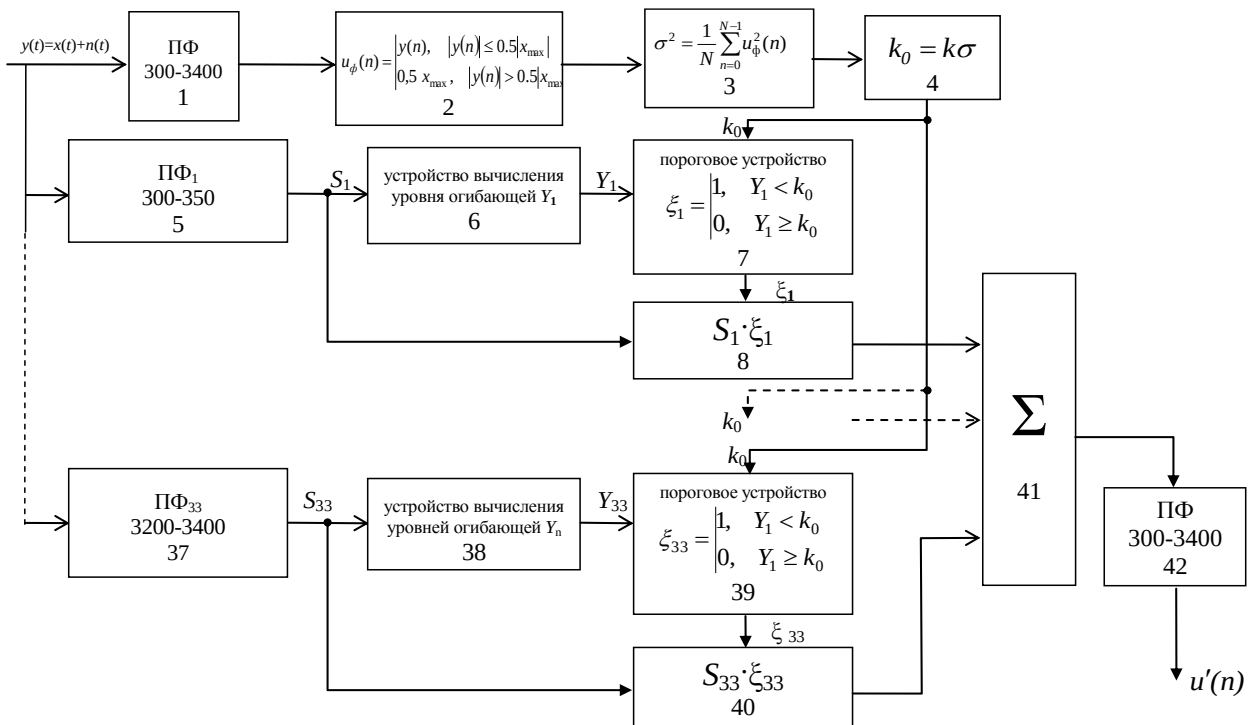


Рис. 8. Устройство адаптивного подавления акустических помех

При этом применен метод выбора числа каналов и значений полос пропускания каналов Δf в зависимости от заданной совместной вероятности сосредоточенных помех и формантных составляющих (рис. 9).

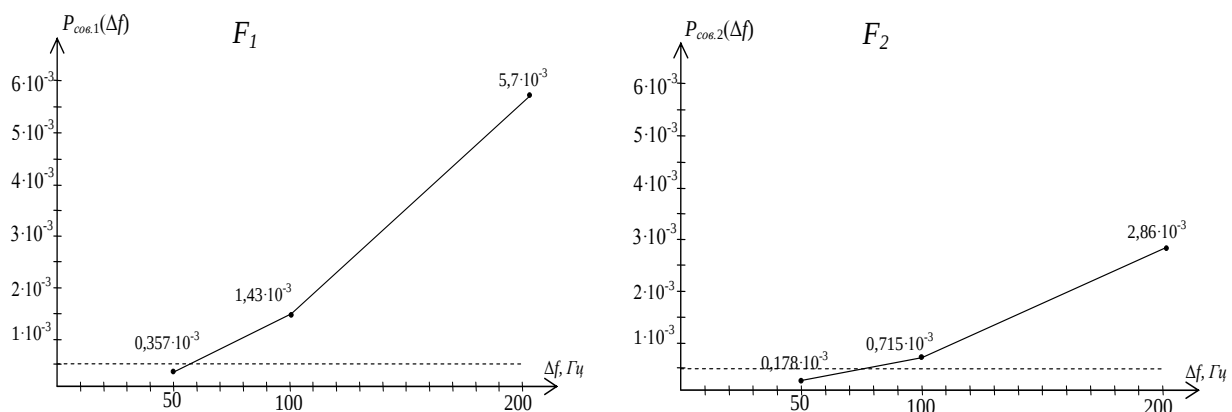
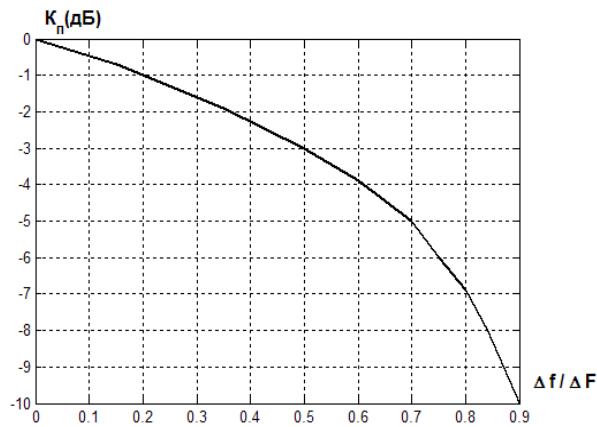
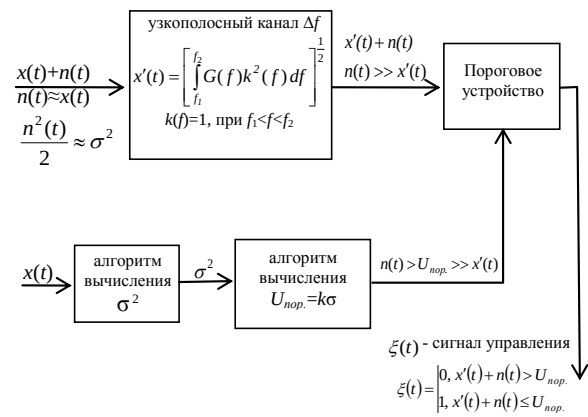


Рис. 9. Зависимость совместной вероятности формантных составляющих и сосредоточенных помех от Δf : F_1 – первая форманта, F_2 – вторая форманта

Однако, появление областей режекции Δf в АЧХ канала полосой ΔF приводит к потерям энергии полезного сигнала на величину ΔP . В работе исследован вопрос о зависимости потерь от полосы области режекции Δf , результаты представлены на рис. 10а.



а) график потерь энергии полезного сигнала в зависимости от ширины области режекции Δf



б) структурная схема формирования сигнала управления

Рис. 10. Зависимости потерь от полосы области режекции

Из графика на рис. 10а видно, что энергетические потери полезного сигнала составляют доли децибела при выполнении условия $\Delta f \ll \Delta F$.

Разработан алгоритм формирования сигналов адаптивного управления каналами (см. рис. 10б), с помощью которого формируются области режекции в многоканальных алгоритмах подавления помех. В частности, данный алгоритм управления реализован в устройстве адаптивного подавления акустических помех (см. рис. 8)

На рис. 11 представлен разработанный алгоритм многоканальной адаптивной фильтрации речевых сигналов и подавления помех методами кратковременного ДПФ [24].

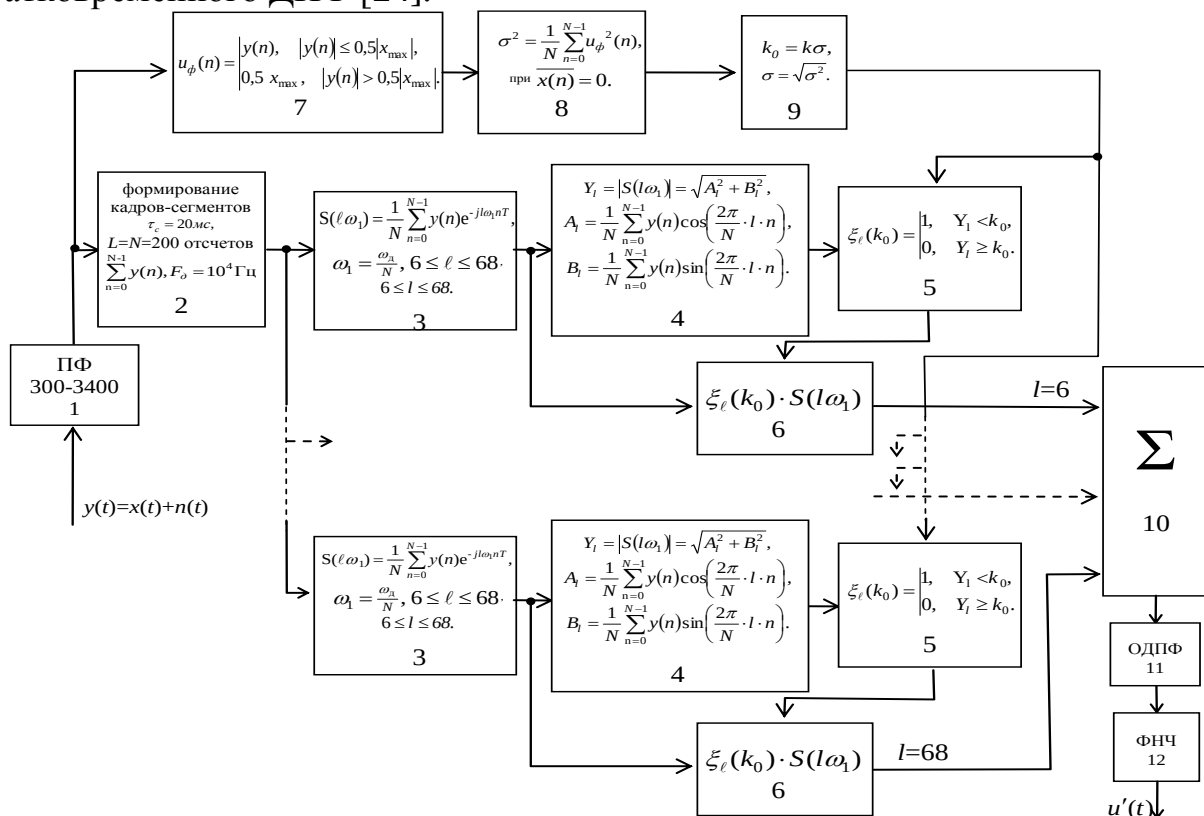


Рис. 11. Устройство многоканальной линейной фильтрации методами ДПФ

С помощью данного алгоритма по числу отсчетов N в кадре τ_c аддитивной суммы сигнала и помехи вычисляются спектральные составляющие с помощью ДПФ на конечном интервале. Получается спектральная функция в дискретном виде, с отсчетами спектральных составляющих через $f_1 = F_o/N$, на частотах lf_1 , где l в общем случае в пределах $0 \leq l \leq N-1$. Для реализации тракта с полосой от $F_n=300$ Гц до $F_o=3400$ Гц, $l_{\min} = F_n/f_1$ и $l_{\max} = F_o/f_1$. Вычисляется модуль каждой спектральной составляющей и, если выполняется условие $|s(l \cdot f_1)| > k_0$, то канал считается пораженным помехой и данная составляющая выключается.

Сумма составляющих, у которых их модули не превысили порог k_0 , поступают на сумматор. Выходной суммарный сигнал преобразуется с помощью обратного ДПФ, на выходе получают аналоговый речевой сигнал, очищенный от помех.

Полученные результаты исследований моделированием показывают, что с помощью алгоритма на рис. 11 можно получить подавление помех до 15 дБ. Исследования проводились при следующих параметрах модели: длительность окна $\tau_c = 20 \cdot 10^{-3}$ с, $F_o = 104$ Гц, $N = 200$, $f_1 = 50$ Гц, $l_{\min} = 6$, $l_{\max} = 68$.

В работе рассмотрены вопросы компенсации внешних акустических помех-эхосигналов. Для построения более эффективных алгоритмов эхокомпенсаторов, разработана новая модель эхосигналов, построенная на оценке долговременных параметров эха, позволяет уменьшить число отводов адаптивных фильтров и, соответственно, увеличить скорость их настройки [25]. Поэтому проблема высоких порядков адаптивных фильтров в эхокомпенсаторе упрощается, если обеспечивать компенсацию в локальном диапазоне задержек. В этом случае число отводов адаптивных фильтров уменьшается, число локализованных задержек уменьшается до $1 \div 3$. Таким образом, по суммарному числу отводов в схеме эхокомпенсатора имеет место заметный выигрыш. Структурная схема адаптивного фильтра принимает вид как на рис. 12.

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 выборки опорного сигнала $u(n)$, соответственно.

Структура алгоритма многоканальной адаптивной компенсации, разработанного с применением новой модели эхо-сигналов приведена на рис. 13.

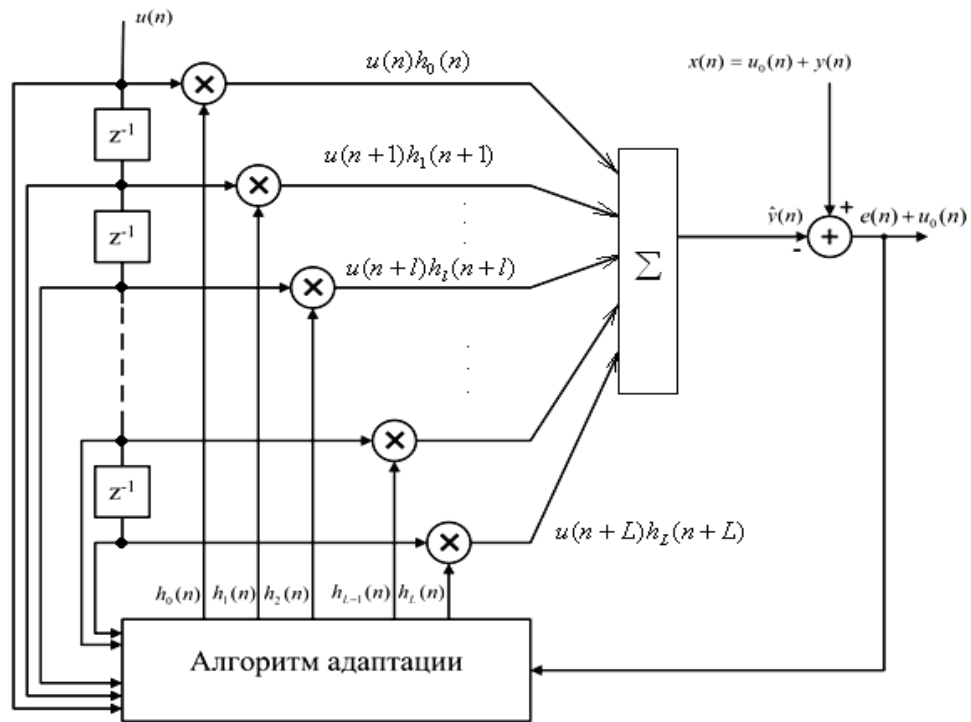


Рис. 12. Структурная схема адаптивного фильтра компенсации эхо-сигнала

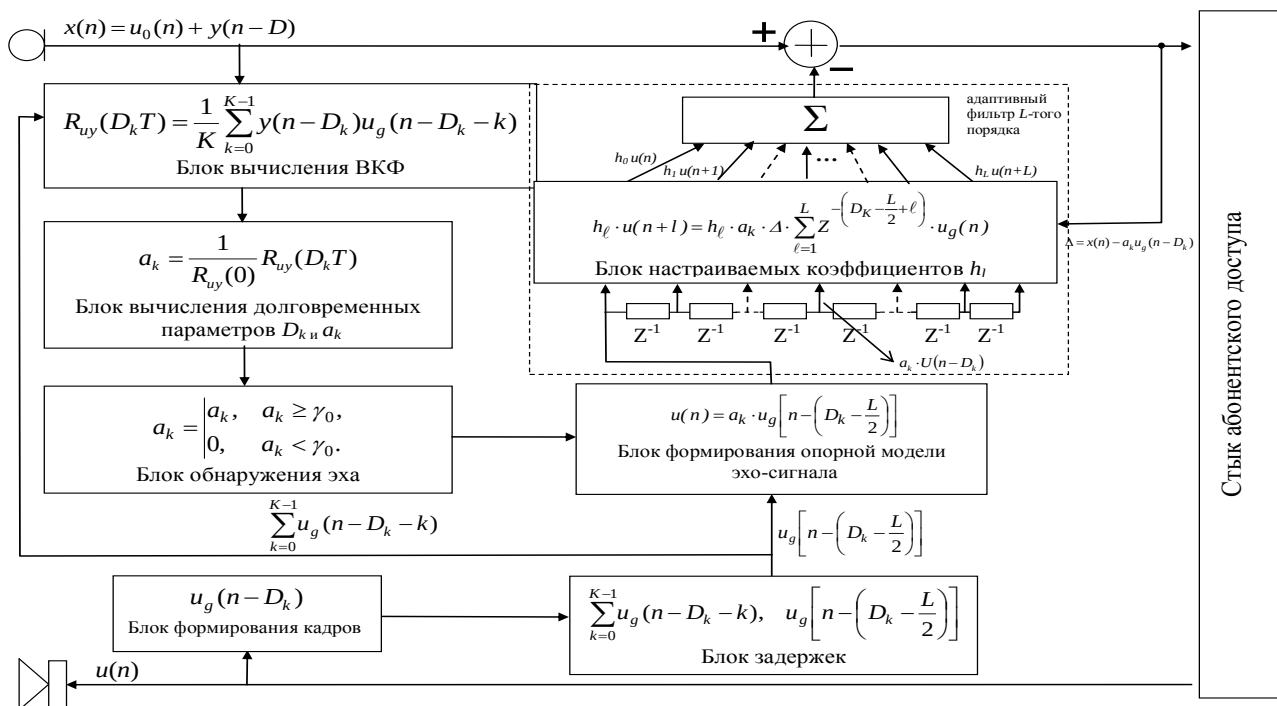


Рис. 13. Структурная схема однополосной обработки многоканальной адаптивной компенсации эхо-сигналов

Назначение блока корреляторов в представленном алгоритме многоканальной компенсации состоит в определении набора ковариационных функций. По максимумам этих функций в блоке настройки задержек оцениваются значения долговременных параметров эхо-сигналов и, соответственно, определяется число каналов компенсации.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили создание более эффективных диспетчерско-технологических систем телекоммуникаций, систем громкоговорящей связи обмена речевыми сообщениями в условиях сложной помеховой обстановки. Разработаны методы построения моделей сигналов и моделей алгоритмов обработки, разработаны методы определения параметров систем передачи и обмена речевыми сообщениями, разработаны более эффективные алгоритмы подавления внешних акустических шумов и помех, разработаны более быстродействующие алгоритмы компенсации эхосигналов. Решены вопросы повышения эффективности передачи информации речевыми сообщениями в распределенных оперативно-командных телекоммуникационных системах на многофункциональных объектах, работающих в условиях воздействия помех интенсивностью до 90 дБ. Представлены разработанные структуры устройств подавления внешних акустических помех и устройств адаптивных эхокомпенсаторов, позволяющие получить на выходе системы аудиообмена отношение $P_c / P_{\text{ак. пом.}}$ более 20 дБ и, соответственно, обеспечить слоговую разборчивость речевых сообщений $S \geq 93\%$.

Литература

1. Сапожков М. А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. М.: Связьиздат, 1962. 452 с.
2. Фланаган Дж. Л. Анализ, синтез и восприятие речи. М.: Связь, 1968. 396 с.
3. Рабинер Л. Р., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1975. 835 с.
4. Назаров М. В., Прохоров Ю. Н. Методы цифровой обработки и передачи речевых сигналов. М.: Радио и связь, 1985. 600 с.
5. Граничин О. Н., Поляк Б. Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003. 296 с.
6. Нестеров Ю. Е. Введение в выпуклую оптимизацию. М.: МЦНМО, 2010. 280 с.
7. Катковник В. Я. Методы алгоритмической оптимизации // Методы исследования нелинейных систем автоматического управления. М.: Наука, 1975. 448 с.
8. Кропотов Ю. А. Исследование вопросов повышения эффективности передачи информации речевым сигналом // Радиотехника. 2006. № 11. С. 66-68.
9. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Метод барьерных функций в задаче оценивания параметризованной аппроксимации плотности вероятностей с ограничениями // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9/2. С. 209-211.
10. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Оценивание параметризованной аппроксимации плотности вероятностей методом барьерных функций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 3. С. 37-43.

11. Кропотов Ю. А. Статистические параметры сигналов при проектировании оперативно-командных телекоммуникационных систем // В мире научных открытий. 2010. № 6-1. С. 39-44.
12. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 46-50.
13. 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.
14. Кропотов Ю. А., Кульков Я. Ю. Аппроксимация закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 11. С. 63-66.
15. Кропотов Ю. А. Временной интервал определения закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 6. С. 97-98.
16. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Оценивание акустических тональных сигналов методами линейной и нелинейной регрессии // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 1. С. 71-73.
17. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А., Еременко В. Т., Карасев О. Е. Идентификация моделей дискретных линейных систем с переменными, медленно изменяющимися параметрами // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 1. С. 57-62.
18. Кропотов Ю. А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2007. № 3. С. 44-47.
19. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61-66.
20. Кропотов Ю. А., Быков А. А., Проскуряков А. Ю. Исследование методов спектрального анализа речевых сигналов // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). Севастополь, 2008. С. 308-309.
21. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости.
22. 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.
23. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. Метод интерполяционной фильтрации в задачах обработки речевых сигналов во временной области // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 7. С. 12-17.
24. Кропотов Ю. А. Способ многоканального адаптивного подавления акустических шумов и сосредоточенных помех и устройство для его осуществления // Патент на изобретение № 2477533.

25. Кротов Ю. А., Ермолаев В. А. Об адаптивном алгоритме наименьших квадратов в задачах компенсации акустического эха // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. №2. С. 40-44.

References

1. Sapozhkov M. A. *Rechevoj signal v kibernetike i svjazi* [The Speech Signal in Cybernetics and Communication]. Moscow, Communication publisher Publ, 1962, 452 p. (In Russian).
2. Flanagan D. L. *Analiz, sintez i vosprijatie rechi* [Analysis, Synthesis and Speech Perception]. Moscow, Communications Publ, 1968, 396 p. (In Russian)
3. Rabiner L. R., Gould B. *Teorija i primenenie cifrovoj obrabotki signalov* [Theory and Application of Digital Signal Processing]. Moscow, World Publ, 1975, 835 p. (In Russian).
4. Nazarov M. V., Prohorov Ju. N. *Metody cifrovoj obrabotki i peredachi rechevyh signalov* [Methods of Processing and Transmitting Digital Speech Signals]. Moscow, Radio and Communications Publ, 1985. 600 p. (In Russian).
5. Granichin O. N., Poljak B. T. *Randomizirovannye algoritmy ocenivaniya i optimizacii pri pochte proizvol'nyh pomehah* [Randomized Algorithms for Estimation and Optimization with Nearly Arbitrary Interference]. Moscow, Science Publ, 2003. 296 p. (In Russian).
6. Nesterov Ju. E. *Vvedenie v vypukluju optimizaciju* [Introduction to Convex Optimization]. Moscow, Moscow Center Continuous Mathematical Education Publ, 2010, 280 p. (In Russian).
7. Katkovnik V. Ja. *Metody algoritmicheskoy optimizacii. Metody issledovanija nelinejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija* [Algorithmic Optimization Methods. Methods of Nonlinear Systems of Automatic Control]. Moscow, Science Publ, 1975. 448 p. (In Russian).
8. Kropotov Y. A. Issledovanie voprosov povyshenija jeffektivnosti peredachi informacii rechevym signalom [Investigation of How to Enhance the Speech Signal Transmission Information]. *Radiotekhnika*, 2006, no. 11, pp. 66-68 (In Russian).
9. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Metod bar'ernyh funkcij v zadache ocenivaniya parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej s ograničenijami [The Method of Barrier Function in the Problem of Estimating the Probability Density Approximation Parameterized with Restrictions]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 9/2, pp. 209-211 (In Russian).
10. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ocenivanie parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej metodom bar'ernyh funkcij [Evaluation of Parameterized Probability Density Approximation Method of Barrier Functions]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2013, no. 3, pp. 37-43 (In Russian).
11. Kropotov Y. A. Statisticheskie parametry signalov pri proektirovanii operativno-komandnyh telekommunikacionnyh system [The Statistical Parameters of Signals in the Design of Operational Command of Telecommunication Systems]. *V mire nauchnyh otkrytij*, 2010, no. 6-1, pp. 39-44 (In Russian).

12. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. O korreljacionnom ocenivanii parametrov modelej akusticheskikh jecho-signalov [About Correlation Estimating Model Parameters of Acoustic Echo]. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, Vol. 1, no. 1, pp. 46-50 (In Russian).

13. Kropotov Y. A. Jeksperimental'nye issledovaniya zakona raspredelenija verojatnosti amplitud signalov sistemy peredachi rechevoj informacii [Experimental Study of the Law of Probability Distribution of Signal Amplitudes of Transmission of Voice Information]. *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*, 2006, Part. 4, pp. 37-42 (In Russian).

14. Kropotov Y. A., Kulkov Y. Y. Approksimacija zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [Approximation of the Laws of Probability Distribution of Amplitudes of the Speech Signal]. *Radiotekhnika*, 2006, no. 11, pp. 63-66 (In Russian).

15. Kropotov Y. A. Vremennoj interval opredelenija zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [The Time Interval Determining the Law of Probability Distribution of Amplitudes of Speech Signal]. *Radiotekhnika*, 2006, no. 6, pp. 97-98 (In Russian).

16. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ocenivanie akusticheskikh tonal'nyh signalov metodami linejnoy i nelinejnoy regressii [Estimation of Acoustic Tones Methods of Linear and Non-Linear Regression]. *Radiotekhnicheskie i telekomunikacionnye sistemy*, 2011, no. 1, pp. 71-73 (In Russian).

17. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A., Eremenko V. T., Karasev O. E. Identifikacija modelej diskretnyh linejnyh sistem s peremennymi, medlenno izmenjajushhimisja parametrami [Identification of Models of Discrete Linear Systems with Variable, Slowly Changing Parameters]. *Radiotekhnika i jelektronika*, 2010, vol. 55, no. 1, pp. 57 – 62 (In Russian).

18. Kropotov Y. A. Algoritm opredelenija parametrov jeksponencial'noj approksimacii zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala [The Algorithm Determining Parameters of the Exponential Approximation of the Laws of Probability Distribution of Amplitudes of Speech Signal]. *Radiotekhnika*, 2007, no. 3, pp. 44-47 (In Russian).

19. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approksimacija zakona raspredelenija verojatnosti otschetov signalov akusticheskikh pomeh. [Approximation of the Laws of Probability Distribution of Samples of Signals of Acoustic Noise] *Radiotekhnicheskie i telekomunikacionnye sistemy*, 2011, no. 2, pp. 61-66 (In Russian).

20. Kropotov Y. A., Bykov A. A., Proskurjakov A. Y. Issledovanie metodov spektral'nogo analiza rechevyh signalov [Research Methods of Spectral Analysis of Speech Signals]. *Materialy 18 Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii «SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii» (CriMiKo'2008)*, Sevastopol, 2008. Vol. 2, pp. 308-309.

21. Russian Standard 50840-95. Peredacha rechi po traktam svjazi. metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti. [Voice of the Communication Path. Methods for Evaluating the Quality, Legibility and Recognition] (In Russian).

22. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algoritm podavlenija akusticheskikh shumov i sosredotochennyh pomeh s formantnym raspredeleniem polos rezhekicii [Acoustic

Noise Suppression Algorithm and Concentrated Interference with Formant Band Allocation Rejection]. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60-65 (In Russian).

23. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Metod interpoljacionnoj fil'tracii v zadachah obrabotki rechevyh signalov vo vremennoj oblasti [Method of Interpolation Filtering Processing Tasks of Speech Signals in the Time Domain]. *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij*, 2008, no. 7, pp. 12-17 (In Russian).

24. Kropotov Y. A. Sposob mnogokanal'nogo adaptivnogo podavlenija akusticheskikh шумов i sosredotochennyh помех i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. patent na izobretenie № 2477533 [The Method of Multi-Channel Adaptive Suppression of Acoustic Noise and Concentrated Interference and Device for its implementation. Patent application № 2477533]. №2011116625/08 of 26.04.2011, patent published 10.03.2013, newsletter number no. 7 (In Russian).

25. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ob adaptivnom algoritme naimen'shih kvadratov v zadachah kompensacii akusticheskogo jeha [About Adaptiv Least Squares Algorithm in Problems of Acoustic Echo Cancellation]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2012, vol. 2, pp. 40-44 (In Russian).

Статья поступила 19 июня 2015 г.

Информация об авторах

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор. Зав. кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет 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

Белов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Проскуряков Александр Юрьевич – кандидат технических наук. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Колпаков Александр Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных

интересов: распараллеливание вычислительных процессов, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru
Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Methods of Designing Telecommunication Information and Control Audio Exchange Systems in Difficult Noise Conditions

Kropotov Y. A., Belov A. A., Proskuryakov A. Y., Kolpakov A. A.

Purpose. Information transfer voice messaging is a powerful tool for operational management, ensuring reliable operation of complex objects, which increases the performance requirements for information management systems audio-exchange in a complex interference environment. **Methods.** During the research applied the methods of adaptive compensation, linear and nonlinear filtering, **Results.** The work carried out research and development of methods and theoretical approaches to the creation of speech signal processing algorithms that improve the efficiency of information and control telecommunication systems audio-exchange when exposed to external acoustic noise of high intensity.

Developed algorithm for estimating the histogram of experimental probability density function of the digitized voice signal. The dependence of the accuracy of estimating the probability density function of analysis time. For example, to compute this probability density function algorithm with an error lowly 5% is required analysis time of 0.3 seconds, for calculations with an accuracy of lowly 1% of the required analysis time of 4.5 seconds.

Compared with the known methods of reduction of the probability density of the speech signal having a significant error recovery algorithms are considered more accurate. Most preferred criteria for maximum precision and the computational complexity is minimal algorithm based on the polynomial approximating the histogram system of exponential functions.

The developed algorithm histogram of experimental evaluation of a one-dimensional function of the law of probability density distribution of voice and recurrent algorithm for determining the parameters of a polynomial approximation of a system of exponential functions provides error recovery above the distribution function of the probability density of less than 5%, when used in the approximating polynomial function of the third order.

A mathematical model of the distribution function of the probability density signals to external acoustic noise interference, obtained using histogram estimation algorithm and recursive algorithm for calculating a parameter representing a number of Gaussian curves of the third order. Error Recovery dimensional probability density distribution function of external acoustic noise is achieved by less than 4.8%.

Studies of various approximations power spectral density voice and acoustic noise interference have shown that the approximation of the Lagrange interpolation polynomial or cubic spline have almost the same error in the approximation of the spectral function of the Lagrange polynomial of order 11 get the error 3,39...4.82%.

Comparative studies of the spectral characteristics of voice and acoustic noise have shown that the spectrum of acoustic noise with respect to the spectrum of the speech signal is shifted to lower frequencies of the audio range and is in the range 0...1000 Hz. Thus, the noise spectrum is concentrated in a sea area from 0 to 500 Hz, the spectrum of wind noise is concentrated in the range of from 0 to 300 Hz, and the noise spectrum in the engine room or the spectrum of noise in the cockpit of an aircraft is centered between 0 and 1200 Hz.

The research allowed the creation of more efficient dispatch and technological systems of telecommunications, Handsfree Voice Message in a difficult jamming environment. The methods of construction of models of signal processing algorithms and models, methods for determining the parameters of transmission systems and voice messaging, develop better algorithms for suppression of external acoustic noise and interference, developed more advanced algorithms of echo cancellation. The issues increase the efficiency of information transfer voice messages in distributed operational command of telecommunication systems on a multi-functional facilities, operating under the impact of noise intensity to 90 dB. The developed device structures suppress external noise and acoustic echo cancellers of adaptive devices to

allow the system to get the output audio exchange ratio exceeding 20 dB, respectively, to provide syllabic intelligibility of voice messages more 93%.

Key words: processing algorithms, information management telecommunications audio-exchange system, adaptive compensation, linear and nonlinear filtering, environmental monitoring, time series, combined forecasting, artificial neural networks.

Information about Authors

Kropotov Yuriy Anatolievich – Dr. habil. of Engineering Sciences, 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

Belov Alexey Anatolievich – Ph.D. of Engineering Sciences, docent, 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.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Proskuryakov Alexander Jurievich - 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: telecommunications monitoring and forecasting system, information processing. Ph.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Kolpakov Aleksandr Anatolievich- Senior Lecturer of Department «Electronics and Computer Science» Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: parallelization of computing processes, information processing. Ph.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, Orlovskaya street, 23.

УДК 621.391

Модели, алгоритмы системы автоматизированного мониторинга и управления экологической безопасности промышленных производств

Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю., Белов А. А., Колпаков А. А.

Постановка задачи. Одним из путей решения проблемы сокращения загрязняющих выбросов промышленных производств является постоянное исследование и прогнозирование значений концентраций выбросов с помощью системы контроля и управления экологической безопасностью, являющейся составной частью управления технологическими процессами промышленного предприятия. При этом актуальным является создание модели системы оперативного контроля с учетом динамики изменений параметров, прогнозирования значений временных рядов загрязняющих выбросов и геоинформационного отображения с привязкой к местности. **Используемые методы.** В исследованиях применялись методы нейросетевой обработки временных рядов, а также методы вейвлет-преобразований. **Результат.** В работе осуществлено исследование и разработка моделей, методов и алгоритмов обработки, прогнозирования данных об уровнях концентраций загрязняющих выбросов в автоматизированных информационных системах мониторинга негативного воздействия на окружающую среду деятельности промышленного предприятия. Прогнозирование и представление данных осуществляется с применением комбинированного алгоритма, основанного на аппарате вейвлет-преобразований и технологии искусственный нейронных сетей.

Ключевые слова: алгоритмы обработки, экологический мониторинг, временные ряды, комбинированное прогнозирование, искусственные нейронные сети, вейвлет-преобразование.

Введение

Снижение негативного воздействия на окружающую среду загрязняющих выбросов промышленных производств и контроль над выбросами является важной задачей современных промышленных предприятий.

Один из путей решения проблемы сокращения выбросов представляет собой постоянное исследование и прогнозирование значений концентраций, определение зон локализации загрязняющих веществ с помощью системы контроля, являющейся составной частью экологического менеджмента промышленного предприятия. На основе собранных, обработанных и представленных данных об уровнях выбросов становится возможной разработка необходимых рекомендаций для принятия управляющих решений.

В настоящее время созданы и используются различные методы проектирования систем контроля, различные алгоритмы обработки и анализа временных рядов данных о концентрациях выбросов. Вопросы разработки и исследования таких теоретических подходов рассматриваются в работах Ивашук О. А., Константинова И. С. [1], Бокса Дж., Дженкинса Г. [2], Айфичера Э. С. [3], Галушкина А. И. [4].

В существующих системах автоматизированного контроля и использованных в них алгоритмах решаются задачи представления данных о концентрациях загрязняющих веществ, областях их локализации, однако не всегда в них учитывается динамика изменений негативного влияния промышленного комплекса на окружающую среду, не всегда прогнозируются изменения экологической безопасности с достаточной точностью.

В связи с этим, возникает необходимость исследования и разработки новых теоретических подходов, методов и алгоритмов, позволяющих адаптивно учитывать факторы динамических изменений условий экологической безопасности, возникает необходимость разработки алгоритмов автоматизированного представления данных и прогнозирования изменений уровней выбросов с более высоким быстродействием и точностью. Были рассмотрены известные системы контроля загрязняющих выбросов промышленных производств. Исследована обобщенная модель автоматизированной системы управления негативным воздействием на окружающую среду промышленным производством (рис. 1), предполагая, что она является наиболее перспективной.

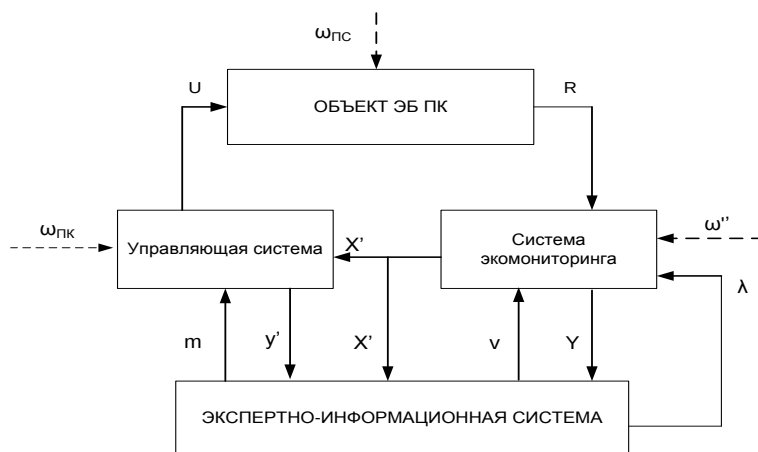


Рис. 1. Обобщенная модель автоматизированной системы управления негативного воздействия промышленных производств

В работе на основе методов вейвлет-преобразования и технологий искусственных нейронных сетей разработана модель обработки и прогнозирования временных рядов данных о концентрациях загрязняющих выбросов, а также функциональная структура системы автоматизированного контроля выбросов промышленных производств.

Построение модели анализа временных рядов на основе вейвлет-обработки позволяет получение информации о данных с более низкой погрешностью за счет снижения их флуктуаций и за счет повышения отношения сигнал/шум.

Также в работе исследуется вопрос интегрирования в систему мониторинга подсистемы по отображению пространственно-координированных данных о концентрациях загрязняющих веществ, выполняет геоинформационное отображение текущих данных, а также отображение полей концентраций прогнозируемых выбросов и их распространения с привязкой к местности [5]. Представлен алгоритм вычисления параметров прогнозируемых концентраций загрязняющих веществ $s(k+r)$ и прогнозируемое значение приземной концентрации вредного вещества

$$C^* = S_1 \cdot m \cdot n \cdot \eta \cdot \frac{A \cdot F \cdot \sum_i M_i^*}{H^2 \sqrt[3]{V_1^* \cdot \Delta T}}, \quad (1)$$

где $\sum_i M_i^*$ - суммарная масса выбрасываемого вредного вещества в единицу времени, определяемая выражением $M^* = s(k+r) \cdot V_1^*$, V_1^* - интегральная скорость выбросов.

Максимальное значение концентраций загрязняющих веществ C^* рассчитывается в узлах координатной сетки геоинформационной системы (ГИС) и по ним осуществляется прорисовка изолиний, отображающих зоны с одинаковым уровнем концентраций.

Разработана программная реализация расчета и визуализации в виде изолиний текущих и прогнозируемых концентраций загрязняющих веществ на выбранном для геомониторинга промышленном предприятии. На рис. 2 представлен фрагмент изображения распространения загрязняющих веществ с помощью изолиний.

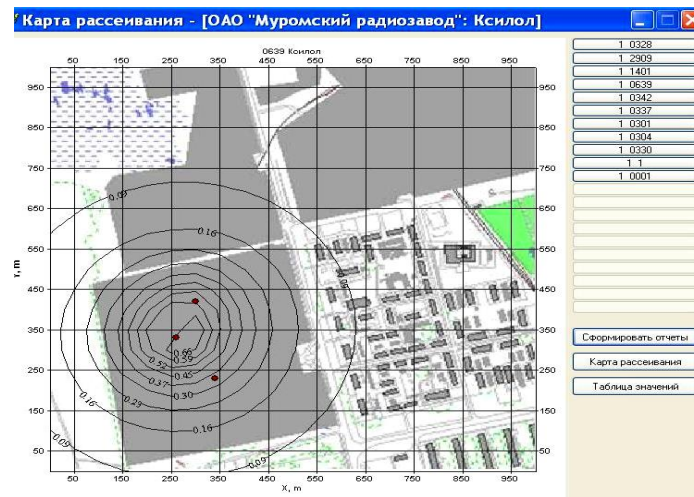


Рис. 2. Представление зон распространения выбросов

Вышерассмотренные требования на отображения полей прогнозируемых концентраций загрязняющих выбросов повышает актуальность создания моделей и алгоритмов прогнозирования временных рядов в системе мониторинга.

Также исследовалась оценка периода временного ряда дискретного представления непрерывной функции концентраций выбросов (на примере паров ацетона и ксилола в реальном производстве) по ее табличным отсчетам $x(k)$, с периодом отсчетов $t_{\text{отсч}}$, в соответствии с практическими данными, выбранными из условия $t_{\text{отсч}} \ll T_{\text{max}}$. Исследования показали, что вычислением коэффициентов ДПФ на последовательности конечной длины из N отсчетов вычисляется функция спектральной плотности по выражению

$$S(jl2\pi f_1) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j \frac{2\pi}{N} l \cdot k}, \quad f_1 = \frac{F_0}{N} = \frac{1}{t_{\text{отсч}} \cdot N}. \quad (2)$$

По вычисленным модулям коэффициентов ДПФ $s(lf_1)$ определяется верхняя частота частотного спектра процесса при значении $s(lf_1) \approx 0$. Получено, что $s(F_6) \approx 0$ с погрешностью до 1% при значении $F_6 = 7f_1$. Максимальный период дискретизации определяется по формуле

$$T_{\text{макс}} = \frac{1}{2F_6} = \frac{1}{14f_1} = 2057,6 \text{ сек.} = 34,3 \text{ мин.}, \text{ при } f_1 = 0,347 \cdot 10^{-4} \text{ Гц.} \quad (3)$$

В работе исследуются две модели прогнозирования с применением ИНС с прямыми и обратными связями. Выбрана модель нейронной сети прямого распространения по критерию меньших вычислительных затрат. Этапы алгоритма обучения представлены в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Этапы алгоритма обучения с прямыми связями на многослойном персептроне

Этап обучения	Формализация этапа
Определение выходов (прямой проход)	$y_j = \begin{pmatrix} \varphi(w_{j1}^T y_{j-1} + w_{01}^j) \\ \varphi(w_{j2}^T y_{j-1} + w_{02}^j) \\ \vdots \\ \varphi(w_{jm_j}^T y_{j-1} + w_{0mj}^j) \end{pmatrix}, j=1, 2, \dots, n, y_0 = C_i(k).$
Определение ошибок (обратный проход)	$e_{j-1} = W_j \Phi_j e_j, j=n, n-1, \dots, 2, e_n = \varphi(s_n) - d,$ $s_j = W_j^T y_{j-1} + w_{j0} = (s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jm_j})^T.$
Коррекция синаптических коэффициентов	$w_{jl}(k+1) = w_{jl}(k) - \alpha h_{jl}(s_{jl}) e_{jl} y_{j-1},$ $w_{j0}(k+1) = w_{j0}(k) - \alpha \Phi_j e_j, w_j = (w_{j1} \ w_{j2} \ \dots \ w_{jm_j}),$ $\frac{\partial \varphi^T(s_j)}{\partial s_j} = \text{diag} \left(\frac{\partial \varphi(s_{j1})}{\partial s_{j1}}, \frac{\partial \varphi(s_{j2})}{\partial s_{j2}}, \dots, \frac{\partial \varphi(s_{jm_j})}{\partial s_{jm_j}} \right) \equiv \Phi_j$ $h_{jl}(s_{jl}) = \frac{\partial \varphi(s_{jl})}{\partial s_{jl}},$

В соответствии с исследованиями [6], результаты которых представлены на рис. 3 и рис. 4 показано, что лучшие результаты прогнозирования можно получить при реализации нейронной сети на трехслойном персептроне прямого распространения.

По графикам на рис. 3 видно, что число нейронов в первом слое трехслойного персептрона должно составлять 64, а во втором и третьем слоях должны составлять по 10 нейронов.

По результатам исследований показано, что наименьшая результирующая погрешность обучения нейронной сети (НС) может быть получена при использовании в качестве входных сигналов аппроксимирующих коэффициентов шестого уровня вейвлет-разложения. Математическая модель этапов нейросетевой обработки представлена ниже.

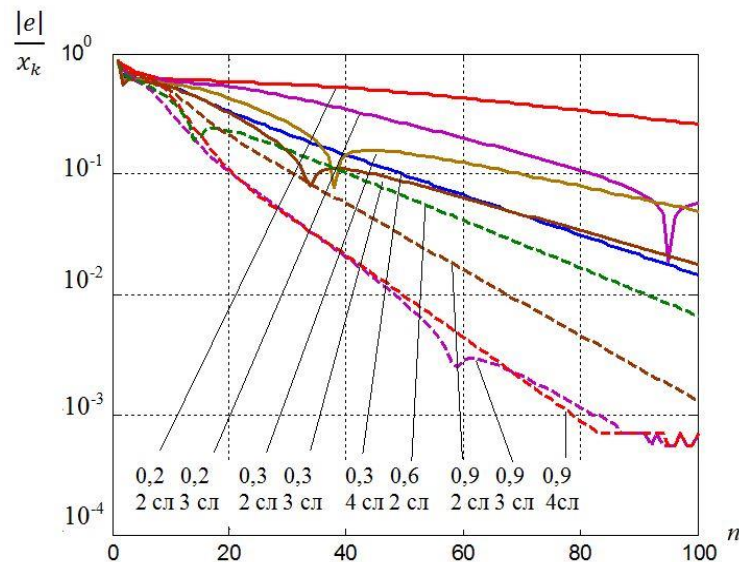


Рис. 3. Ошибки обучения от числа итераций при значениях шага от 0,2 до 0,9

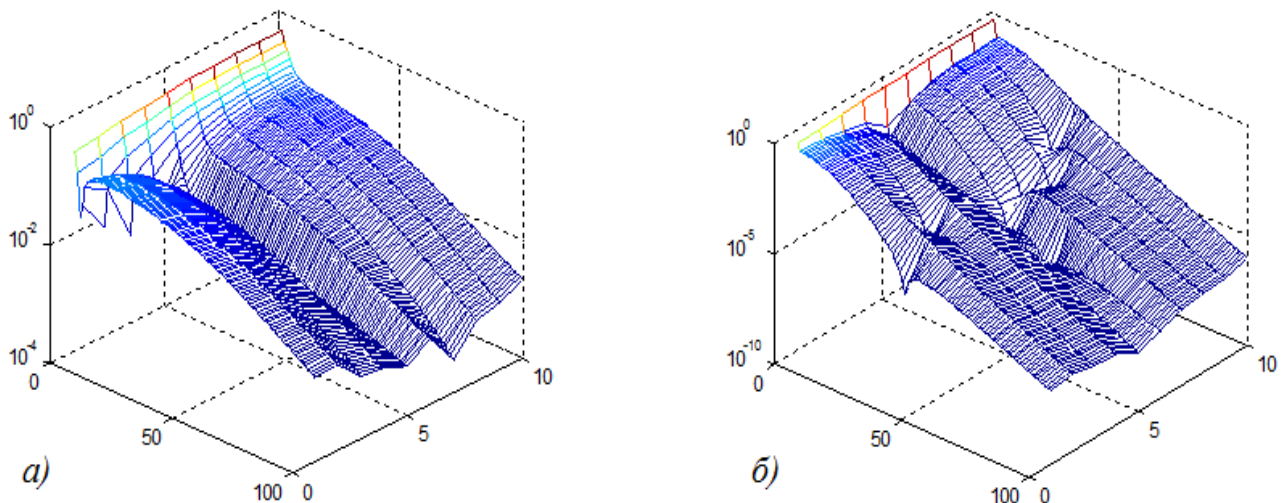


Рис. 4. Графики зависимости ошибки обучения от числа циклов и числа нейронов в сети при значениях шага настройки: а) 0,3; б) 0,9

1. Определение выходов слоев искусственной нейронной сети (ИНС) (прямой проход). Алгоритм прямого распространения.

1.1. Определение выходов 1 и 2 слоя ИНС

$$y_1 = \begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_1^2 \\ \vdots \\ y_1^{64} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi(w_{1,1}^T \cdot C_6 + w_{0,1}^1) \\ \varphi(w_{1,2}^T \cdot C_6 + w_{0,2}^1) \\ \vdots \\ \varphi(w_{1,64}^T \cdot C_6 + w_{0,64}^1) \end{pmatrix}, \quad y_2 = \begin{pmatrix} y_2^1 \\ y_2^2 \\ \vdots \\ y_2^{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi(w_{2,1}^T \cdot y_1 + w_{0,1}^2) \\ \varphi(w_{2,2}^T \cdot y_1 + w_{0,2}^2) \\ \vdots \\ \varphi(w_{2,10}^T \cdot y_1 + w_{0,10}^2) \end{pmatrix}$$

где C_6 – вектор аппроксимирующих коэффициентов, $C_6 = [C_6^1, \dots, C_6^{64}]$, y_1 – вектор выходов первого слоя НС, $y_1 = [y_1^1, \dots, y_1^{10}]^T$.

1.2. Определение выходных аппроксимирующих коэффициентов

$$y_3 = \begin{pmatrix} y_3^1 \\ y_3^2 \\ \vdots \\ y_3^{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi(w_{3,1}^T \cdot y_2 + w_{0,1}^3) \\ \varphi(w_{3,2}^T \cdot y_2 + w_{0,2}^3) \\ \vdots \\ \varphi(w_{3,10}^T \cdot y_2 + w_{0,10}^3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_6^{*1} \\ C_6^{*2} \\ \vdots \\ C_6^{*10} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где y_2 – вектор выходов второго слоя НС, $y_2 = [y_2^1, \dots, y_2^{10}]^T$, C_6^{*r} – результат предсказаний на r - периодов временного ряда.

2. Определение ошибок (обратный проход). Алгоритм обратного распространения ошибки (представлен в таблице 2).

3. Коррекция синаптических коэффициентов. Алгоритм обратного распространения коррекции синаптических коэффициентов (представлен в таблице 2).

Модель восстановления выходного временного ряда с прогнозом изменений данных на r - периодов имеет вид:

$$s(k+r) = \frac{1}{p} \left[u(k) \cdot \psi_1(2t-k) + \left[\sum_{i=2}^5 (C_{i-1}) \cdot \psi_i(2^i t - k) \right] + C_5^* \cdot \psi_6(2^6 t - k) + C_5^{**} \cdot \psi_6(2^6 t - k) \right], \quad (10)$$

$$s(k) = \frac{1}{p} \left[u(k) \cdot \psi_1(2t-k) + \left[\sum_{i=2}^6 (C_{i-1}) \cdot \psi_i(2^i t - k) \right] + C_6 \right]. \quad (11)$$

На основании разработанной модели прогнозирования (10), модели обработки временного ряда (11), разработана структурная схема реализации модели системы мониторинга загрязняющих выбросов (рис. 5) [7, 8].

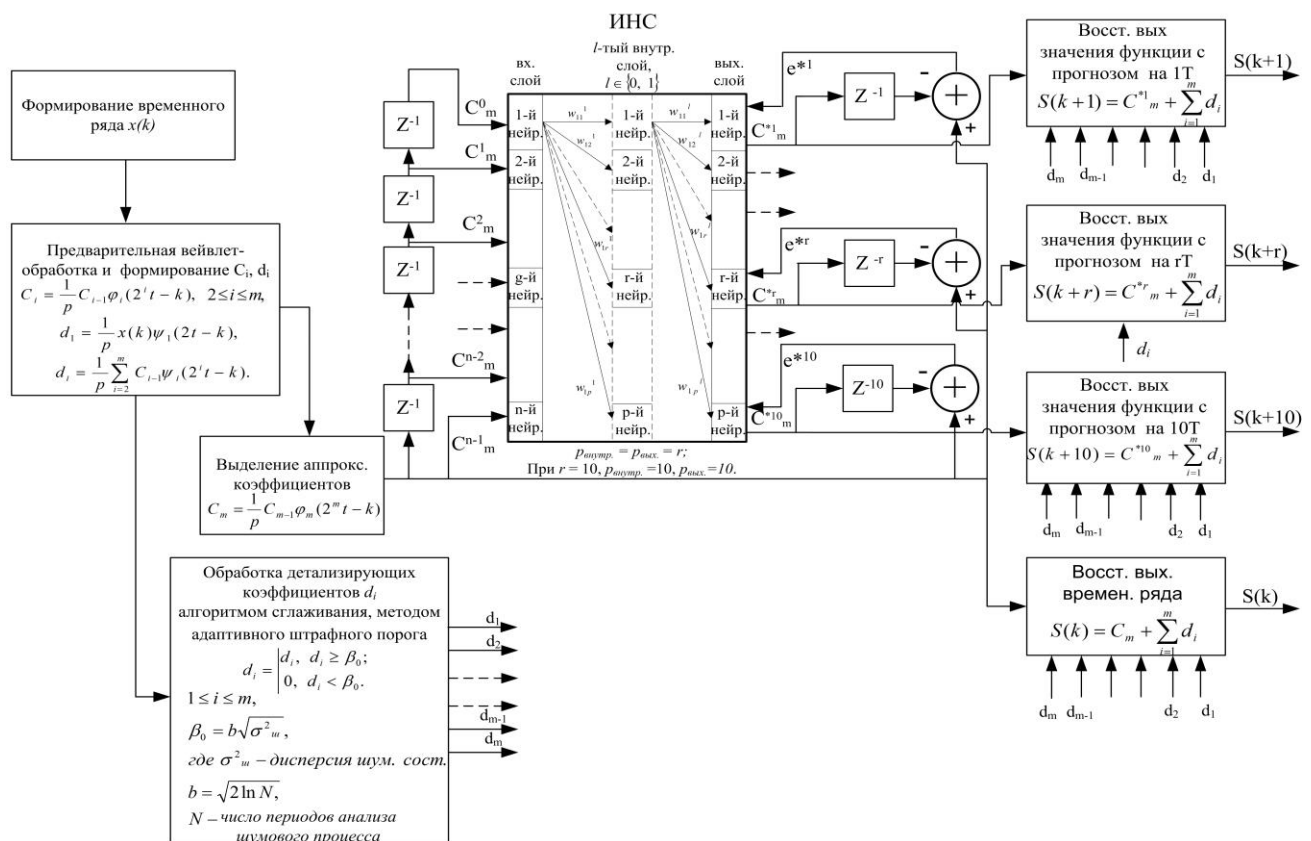


Рис. 5. Структурная схема реализации модели канала прогнозирования

Таким образом, на рис. 5 определена модель обработки в задачах автоматизированного контроля и прогнозирования с применением технологий ИНС.

Проблема контроля в реальном времени обусловлена на алгоритмическом уровне сложной динамикой распределения опасных загрязнений на контролируемом объекте, временными характеристиками датчиков, средств обработки и передачи информации, включая время принятия решения на высшем системном уровне. Для решения данной задачи применяется подсистема анализа и обработки полученных экспериментальных и расчетных временных рядов концентраций загрязняющих веществ. В данном алгоритме прогнозирование и восстановление основано на регрессионном анализе аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования и на применении ИНС.

Временной ряд $x(k)$, формируемый сигналами с датчиков, поступает на блок формализации данных, в котором осуществляется подготовка обучающих выборок для ИНС.

При этом на вход нейронной сети могут быть поданы либо отсчеты временного ряда концентраций $x(k)$, либо коэффициенты вейвлет-разложения C_i, d_i . На процесс идентификации типа ИНС оказывают влияние ряд ограничений, например, поступающие на вход ИНС детализирующие коэффициенты d_i , вычисленные по формуле:

$$d_i = \frac{1}{p} \sum_k C_{i-1} \psi_i(2^i t - k),$$

которые должны пройти обработку в соответствии с правилом порогового сглаживания, которое представлено в виде

$$d_i = \begin{cases} d_i, & \text{при } d_i > \delta \\ 0, & \text{при } d_i \leq \delta \end{cases},$$

где δ - пороговый уровень.

Оптимальный пороговый уровень может вычисляться по различным методам по критерию наилучшего отношения сигнал/шум в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 - Результаты сглаживания

	Исходный сигнал до фильтрации	Критерий Штейна	Эвристический критерий Штейна	Минимаксный критерий	Критерий адаптивного штрафного порога
Мощность Р вх.сигн.	5,608	5,608	5,608	5,608	5,608
Мощность Р вх.шума.	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
ОСШ _{вх}	26,084	-	-	-	-
Мощность Р вых.сигн.	-	5,546	5,580	5,521	5,605
Мощность Р вых.шума.	-	0,153	0,187	0,128	0,119
ОСШ _{вых}	26,084	36,248	29,839	43,133	46,747
ОСШ _{вых} , дБ	14,16	15,59	14,48	16,48	16,69

Из таблицы 2 видно, что наилучшее отношение сигнал/шум, в частности 16,7 дБ, можно достичь, применяя критерий адаптивного штрафного порога. В этом случае значение адаптивного штрафного порога вычисляется по правилу

$$\delta = \sigma \sqrt{2 \ln N}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2},$$

где N – число анализируемых интервалов временного ряда.

Блок схема алгоритма пороговой обработки представлена на рис. 6.

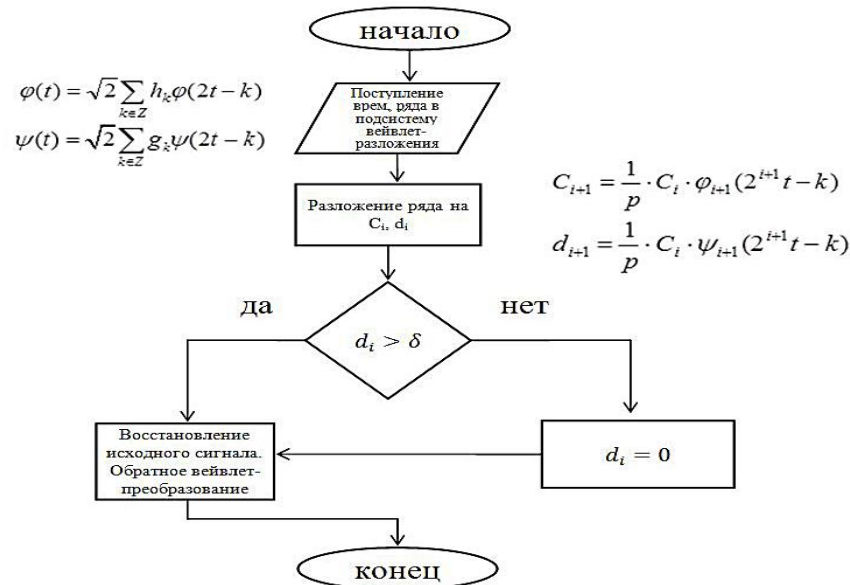


Рис. 6. Алгоритм пороговой обработки детализирующих коэффициентов

После вейвлет-обработки сигнала $x(k)$, путем вычисления аппроксимирующих коэффициентов до n -ого уровня разложения по формулам:

$$C_{0,k} = \frac{1}{p} \sum_k x(k) \varphi_{1,k}(2t - k),$$

$$C_{n,k} = \frac{1}{p} \sum_k C_{n-1} \varphi_n(2^n t - k), \quad (12)$$

восстанавливается обработанный временной ряд с пониженной погрешностью представления данных по выражению

$$s(k) = C_n + d_1 + \dots + d_n,$$

где $d_1, \dots, d_n$ – детализирующие коэффициенты, прошедшие пороговую обработку.

В соответствии с алгоритмом сглаживания и алгоритмом восстановления обработанного временного ряда, а также в соответствии с разработанными алгоритмами определения тренда концентраций загрязняющих выбросов, алгоритма сокращения вычислительных затрат обработки, разработана обобщенная структурная схема автоматизированной системы мониторинга (рис. 7)

Проектирование аппаратно-программной системы контроля выбросов осуществляется на основе комбинированного алгоритма и на его структурных блоках, которые определяют состав системы. Основными структурными блоками системы автоматизированного контроля являются регистрационно-измерительная подсистема сбора и сервер системы мониторинга и прогнозирования.

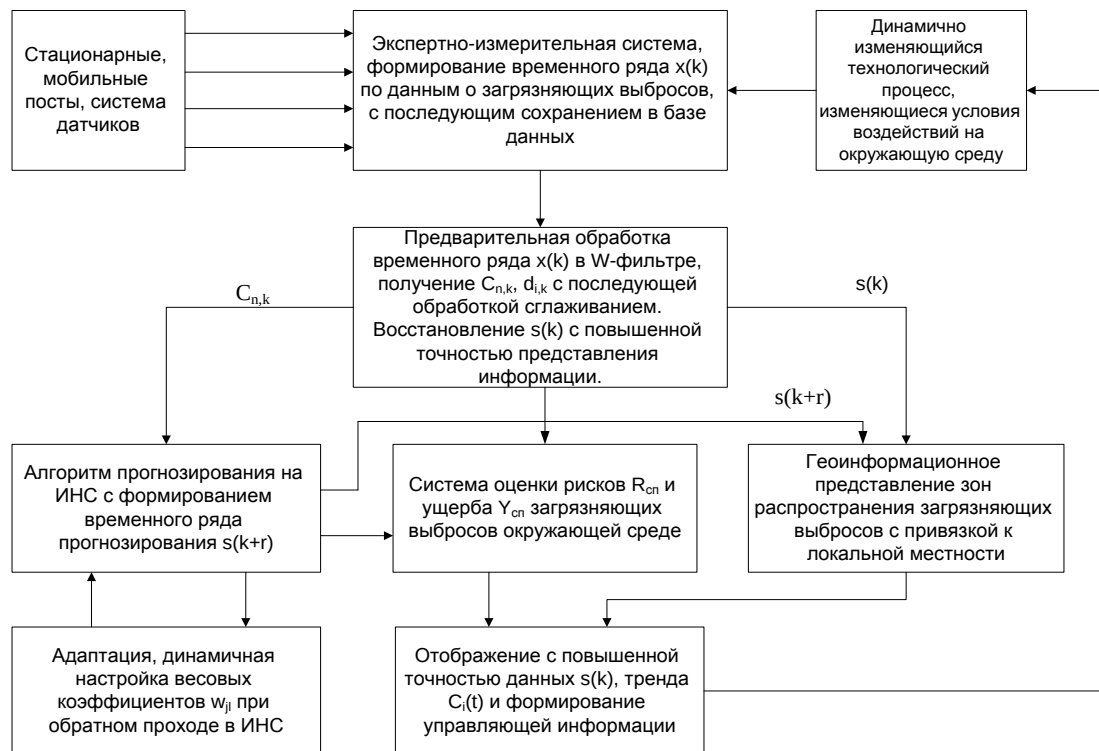


Рис. 7. Обобщенная структурная схема автоматизированной системы мониторинга загрязняющих выбросов

Сервер включает серверную часть ПО системы контроля, сервер базы данных системы контроля, модули для анализа и обработки экспериментальных данных, расчетные модули моделирования и прогнозирования значений временных рядов концентраций. Блок-схема ПО серверной части реализации алгоритма предсказаний трехслойной ИНС представлена на рис. 8.

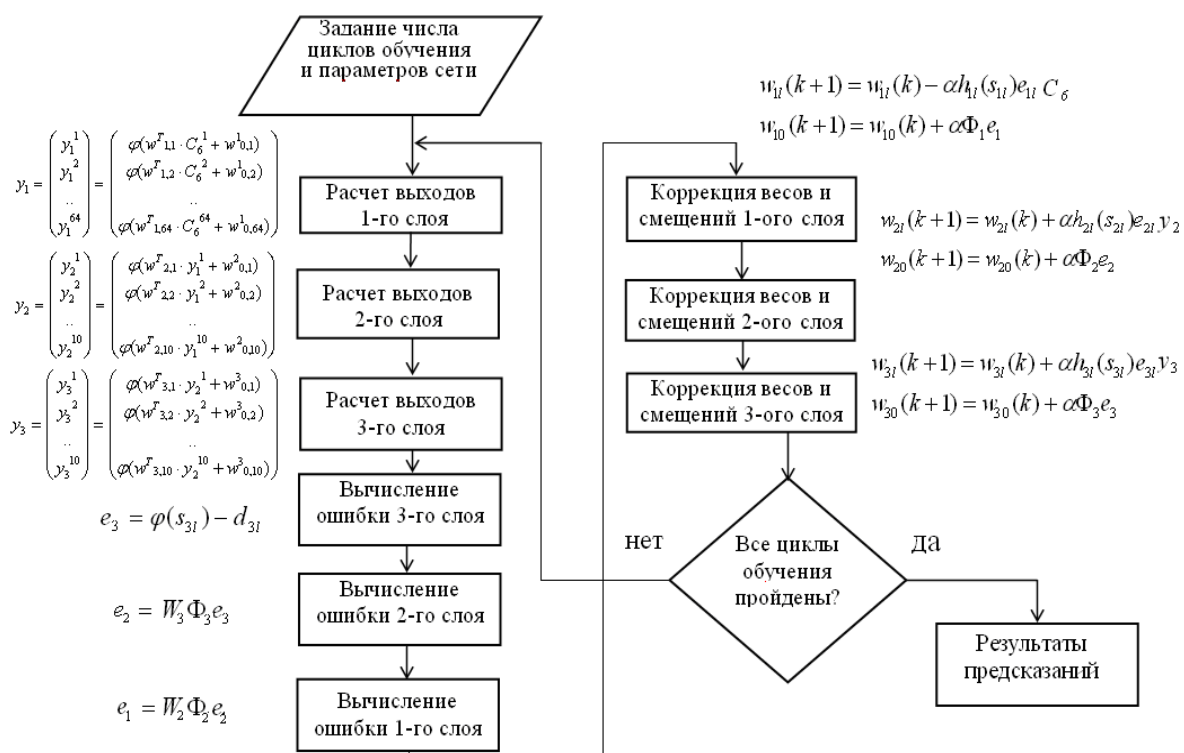


Рис. 8. Блок-схема ПО алгоритма предсказаний трехслойным персептроном

В соответствии с моделью алгоритма предсказаний трехслойным персептроном, были проведены исследования моделированием результатов прогнозирования, были исследованы погрешности прогнозирования. Результаты анализа погрешностей прогнозирования разработанной системы по сравнению с известной, приведены на рис. 9. Структурное решение системы автоматизированного мониторинга и прогнозирования приведено на рис. 10 [9, 10].

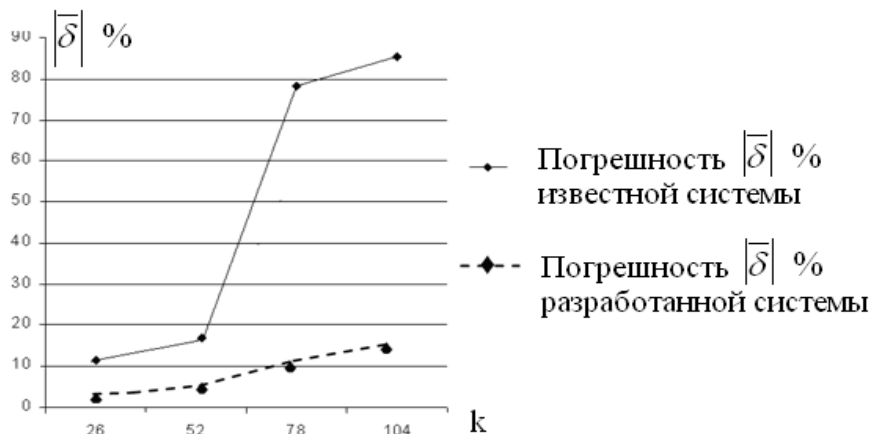


Рис. 9. Погрешности прогнозирования известной и разработанной системы контроля



Рис. 10. Структурная схема программно-аппаратной части автоматизированной системы мониторинга

Выводы

Созданная с применением современных технологий искусственных нейронных сетей и математического аппарата вейвлет-преобразований система автоматизированного контроля и прогнозирования оснащена аппаратно-

программной реализацией на основе современной микропроцессорной техники. В созданной системе решены вопросы более высокой динамики адаптации архитектуры обработки данных при динамично изменяющихся условиях экологической безопасности. В созданной системе автоматизированного контроля осуществляется прогнозирование с существенно меньшей погрешностью по сравнению с известными и увеличено время предсказаний.

Литература

- 1 Иващук О. А., Константинов И. С. Автоматизированная система управления экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 8. С. 44-49.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 408 с.
3. Айфичер Э., Эммануил С., Джервис Барри У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. / Пер с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 992 с.
4. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории. М.: Горячая линия Телеком, 2010. 480 с.
5. Белов А. А., Кропотов Ю. А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 12. С. 9-14.
6. Проскуряков А. Ю. Модель прогнозирования временных рядов на трехслойном персептроне в информационной системе мониторинга загрязняющих выбросов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 2. С. 57–63.
7. Белов А. А., Проскуряков А. Ю. Комбинированный алгоритм прогнозирования на базе вейвлет-преобразования и нейронных сетей // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 109-113.
8. Белов А. А., Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю. Вопросы обработки экспериментальных временных рядов в электронной системе автоматизированного контроля // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. 2010. Вып. 1. С. 95 – 100.
9. Белов А. А., Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю. Автоматизированный анализ и обработка временных рядов данных о загрязняющих выбросах в системе экологического контроля // Информационные системы и технологии. 2010. № 6(62). С. 28 – 35.
10. Белов А. А., Проскуряков А. Ю. Разработка телекоммуникационной системы газового мониторинга для промышленности и коммунального хозяйства с нейросетевой обработкой и прогнозированием данных // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2. С. 63-67

References

1. Ivashhuk O. A., Konstantinov I. S. Avtomatizirovannaja sistema upravlenija jekologicheskoi bezopasnost'ju promyshlennno-transportnogo kompleksa [The Automated Control System of Ecological Safety of Industrial and Transport Complex]. *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij*, 2009, no. 8, pp. 44-49 (In Russian).
2. Boks Dzh., Dzhenkins G. *Analiz vremennyh rjadov. Prognoz i upravlenie* [Time Series Analysis. Forecast and Control]. Moscow, World Publ, 1974. 408 p. (In Russian).
3. Ifeachor, Emmanuel C., Barrie W. Jervis. Digital signal processing: a practical approach. Pearson Education, 2002.
4. Galushkin A. I. *Nejronnye seti. Osnovy teorii* [Neural Network. Fundamentals Theory]. Moscow, Hotline-Telecom Publ, 2010. 480 p. (In Russian)
5. Belov A. A., Kropotov Y. A. Issledovanie voprosov szhatiia i poiska kartograficheskoi informatsii metodom veivlet-preobrazovanii v jekologicheskoi geoinformatsionnoi sisteme [Research of Questions the Compression and Retrieval of Map Information by Wavelet Transforms Environmental Geographic Information System]. *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij*, 2008, no. 12, pp. 9-14 (In Russian).
6. Proskurjakov A. Y. Model' prognozirovaniia vremennykh riadov na trekhsloinom perseptrone v informatsionnoi sisteme monitoringa zagriazniaiushchikh vybrosov [Model Prediction of Time Series on the Three-Layer Perceptron in the Information System for Monitoring of Pollutant Emissions]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2014, no. 2, pp. 57-63 (In Russian).
7. Belov A. A., Proskurjakov A. Y. Kombinirovannyi algoritm prognozirovaniia na baze veivlet-preobrazovanii i nejronnykh setei [Combined Prediction Algorithm Based on Wavelet Transform and Neural Networks]. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*, 2011, no. 13, pp. 109-113 (In Russian).
8. Belov A. A., Kropotov Y. A., Proskurjakov A. Y. Voprosy obrabotki jeksperimental'nyh vremennyh rjadov v jelektronnoj sisteme avtomatizirovannogo kontrolja [Questions Processing of Experimental Time Series in the Electronic System of Automated Control]. *Voprosy radiojelektroniki*, 2010, Part. 1, pp. 95–100 (In Russian).
9. Belov A. A., Kropotov Y. A., Proskurjakov A. Y. Avtomatizirovannyj analiz i obrabotka vremennyh rjadov dannyh o zagriaznjajushchih vybrosah v sisteme jekologicheskogo kontrolja [Automated Analysis and Processing of Time-Series Data on Pollutant Emissions in the Environmental Control]. *Informacionnye sistemy i tehnologii*, 2010, no. 6(62), pp. 28–35 (In Russian).
10. Belov A. A., Proskurjakov A. Y. Razrabotka telekommunikacionnoj sistemy gazovogo monitoringa dlja promyshlennosti i kommunal'nogo hozjajstva s nejrosetevoj obrabotkoj i prognozirovaniem dannyh [Development of Telecommunication Gas Monitoring System for Industry and Utilities with Neural Network Processing and Forecasting Data]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*, 2012, no. 2, pp. 63-67 (In Russian).

Статья поступила 19 июня 2015 г.

Информация об авторах

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор. Зав. кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет 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

Проскуряков Александр Юрьевич – кандидат технических наук. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Белов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Колпаков Александр Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: распараллеливание вычислительных процессов, обработка информации. Тел.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

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

Models, Algorithms System of Automated Monitoring and Management of Ecological Safety Industrial Plants

Kropotov Y. A., Proskuryakov A. Y., Belov A. A., Kolpakov A. A.

Purpose. One solution to the problem of reducing emissions of polluting emissions from industrial plants is the constant research and forecasting, the emission concentrations using the control system of ecological safety, which is part of the process control industrial enterprise. This is urgent to create a model of the system of operational control, taking into account the dynamics of changes in the parameters, the values of the time series prediction of pollutant emissions and geo-information display with location. **Methods.** During the research applied the methods of wavelet transformation, neural processing methods and forecasting data. **Results.** The work carried out research and development of models, methods and algorithms for predicting the data on levels of concentrations pollutant emissions in automated information systems for monitoring adverse impact on the environment of an industrial enterprise. Forecasting and

presenting data is carried out using a combination algorithm based on the wavelet transform and artificial neural network technology.

Key words: algorithms for processing, environmental monitoring, time series, the combined prediction, artificial neural networks, wavelet transform.

Information about Authors

Kropotov Yuriy Anatolievich – Dr. habil. of Engineering Sciences, 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

Proskuryakov Alexander Jurievich - 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: telecommunications monitoring and forecasting system, information processing. Ph.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Belov Alexey Anatolievich – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, 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.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Kolpakov Aleksandr Anatolievich - Senior Lecturer of Department «Electronics and Computer Science» Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: parallelization of computing processes, information processing. Ph.: +7-49234-772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, Orlovskaya street, 23.