

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

УДК 623.618.5

**ЗАЛИЗКО  
Александр Юрьевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С КОММУТАЦИЕЙ  
ПАКЕТОВ К ОТКАЗАМ СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**Минск, 2020**

Работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

**Научный руководитель** – *Кругликов Сергей Владимирович*, доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» по научной и инновационной работе.

**Официальные оппоненты:** *Цветков Виктор Юрьевич*, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

*Касанин Сергей Николаевич*, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по науке государственного предприятия «Научно-исследовательский институт технической защиты информации».

**Оппонирующая организация** – открытое акционерное общество «Гипросвязь».

Защита состоится 9 апреля 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. (017) 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «    » 2020 г.

**Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.15.02  
кандидат технических наук, доцент**

**Т.А.Пулко**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Практическая реализация концепции ситуационного центра для обеспечения принятия своевременного оптимального управленческого решения в кризисных ситуациях различного характера ужесточает требования по оперативности, непрерывности и устойчивости, предъявляемые к вновь создаваемым распределенным многофункциональным информационно-управляющим системам (МИУС), использующим в своем составе современные средства оптоэлектронного мониторинга [1, 7, 13]. Эта особенность требует применения телекоммуникационных технологий, обеспечивающих достаточно высокую пропускную способность каналов связи между объектами МИУС в условиях внешних (вне сети) преднамеренных воздействий, приводящих к отказам сетевых элементов. Существующие телекоммуникационные сети (ТКС), построенные с использованием современных сетевых устройств и радиосредств отечественного производства, не способны в полной мере обеспечить своевременную передачу данных от оптоэлектронных средств мониторинга к комплексам средств автоматизации (КСА) в условиях отказов элементов (устройств) системы связи [2, 7]. Поэтому при информационном взаимодействии территориально распределенных КСА и средств мониторинга целесообразно применение адаптивных телекоммуникационных сетей (АТКС), построенных с использованием методов параметрической, структурной и функциональной адаптации, а также технологий широкополосного радиодоступа (ШРД) и коммутации пакетов [3, 8, 11, 14]. Отсутствие данных о результатах разработок АТКС требует создания программно-аппаратных средств для исследования применения таких систем связи. В свою очередь, создание программно-аппаратных средств экономически неоправданно без построения специальных имитационных моделей, учитывающих особенности эксплуатации АТКС с коммутацией пакетов в условиях отказов сетевых элементов (устройств) [4, 9, 12].

Таким образом, разработка беспроводных ТКС, построенных с комбинированным использованием методов параметрической, структурной и функциональной адаптации, а также технологий широкополосного радиодоступа и коммутации пакетов, для реализации потенциальных возможностей МИУС, функционирующих в условиях отказов сетевых элементов (устройств), является актуальной научно-практической задачей.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертационной работы включена в план научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» (УО «ВА РБ») и соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности по созданию новых и совершенствованию

существующих систем (сетей) радиосвязи. Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 7.1 «Разработка интегрированных систем автоматизации управления процессами и ресурсами организаций» и 7.6 «Технологии развития информационного общества» направления 7 «Информационно-коммуникационные и авиакосмические технологии», пункту 9.2 «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций» направления 9 «Национальная безопасность и обороноспособность, защита от чрезвычайных ситуаций» Перечня приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016-2020 гг., утверждённого Указом Президента Республики Беларусь № 116 от 22.04.2015.

Результаты диссертационного исследования использованы в следующих крупных научно-исследовательских работах (НИР):

1. «Разработка предложений по облику объединенной системы навигации, связи и опознавания», шифр «Альманах», выполненной в УО «ВА РБ» в 2011 г. в рамках Государственного оборонного заказа.

2. «Обоснование облика элементов системы вооружения с учетом особенностей сетевых подходов к военным действиям», шифр «Система», выполненной в УО «ВА РБ» в 2013 г. в рамках первой государственной программы научных исследований на 2011–2015 гг. «Научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций».

3. «Разработка облика и тактико-технических требований, предъявляемых к организационно-структурным и функционально-обеспечивающим подсистемам информационно-управляющей системы тактического звена управления. Информационная сеть», шифр «Пилигрим», выполненной в УО «ВА РБ» в 2017 г.

### **Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – повышение пропускной способности беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов на основе комбинированного использования структурно-параметрических и функциональных методов адаптации к разным уровням (степени) отказов сетевых элементов (устройств).

*Задачи исследования:*

1. Анализ особенностей построения современных телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов в условиях отказов сетевых элементов (устройств).

2. Разработка математической (имитационной) модели беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов.

3. Проверка на адекватность разработанной математической (имитационной) модели телекоммуникационной сети относительно существующей системы связи с технологиями широкополосного радиодоступа и коммутации пакетов.

4. Разработка методов структурно-параметрического синтеза адаптивной беспроводной телекоммуникационной сети, устойчивой к разным уровням (степени) отказов узловых элементов.

5. Разработка структуры многофункционального устройства адаптивной беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов.

6. Экспериментальные исследования в условиях отказов узловых элементов адаптивной телекоммуникационной сети с технологиями широкополосного радиодоступа и коммутации пакетов.

*Объект* исследования – беспроводная телекоммуникационная сеть с коммутацией пакетов.

*Предмет* исследования – пропускная способность беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов при разных уровнях (степени) отказов сетевых элементов (устройств).

### **Научная новизна**

1. Разработана имитационная в классе агрегативных систем модель телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов, *отличающаяся* от классической агрегативной модели, в которой каждый элемент сети рассматривается как отдельный агрегат со значительным множеством особых состояний, учетом основных параметров каналов связи во внутренних операторах переходов агрегатов типовых устройств, состояний процесса адаптации к отказам элементов сети, параметров моделируемых сетевых устройств, а также способов их взаимодействия на сетевом уровне, что *позволило* сократить временные затраты на моделирование сети более чем в 2 раза в сравнении с классической агрегативной моделью при расхождении расчетных и экспериментальных значений пропускной способности сети менее 10 %.

2. Разработан метод структурно-параметрической адаптации беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов к отказам сетевых элементов средней степени, *отличающийся* от известных методов адаптации, использующих изменение параметров радиointерфейсов сетевых устройств для уменьшения воздействия помех и повышения их пропускной способности, а также протоколы динамической маршрутизации на основе дистанционно-векторных алгоритмов и алгоритмов состояния связей, комплексным применением структурной и параметрической адаптации, что *позволяет* формировать структуру сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при отказе до 24 % узловых элементов, что не менее чем в 10 раз больше пропускной способности системы связи, организованной с использованием известных методов адаптации.

3. Разработан метод функциональной адаптации беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов к отказам сетевых элементов высокой степени, *отличающийся* от методов структурно-параметрической адаптации возможностью адаптивного изменения не только структуры сети и параметров ее элементов, но и функций сетевых устройств за счет использования многофункциональных радиотерминалов, что *позволяет* формировать структуру сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при отказе до 40 %

узловых элементов, что не менее чем в 2 раза больше пропускной способности системы связи, организованной с применением только структурно-параметрической адаптации.

4. Синтезирована структура многофункционального устройства беспроводной адаптивной сети, *отличающаяся* от структур известных устройств связи с технологиями широкополосного радиодоступа совместным использованием динамической маршрутизации и коммутации пакетов, параметрической и функциональной адаптации к отказам узловых элементов, что *позволит* сократить время обработки информационных пакетов в телекоммуникационных устройствах не менее чем в 2,5 раза в сравнении с устройствами связи, функционирующих без применения комбинированной адаптации, и *обеспечить* требуемую пропускную способность сети.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Имитационная в классе агрегативных систем модель телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов, *отличающаяся* от классической агрегативной модели, в которой каждый элемент сети (устройства и каналы связи) рассматривается как отдельный агрегат со значительным множеством особых состояний, учетом основных параметров каналов связи во внутренних операторах переходов агрегатов типовых устройств (абонентских устройств, локальных и магистральных узлов), состояний процесса адаптации к преднамеренным воздействиям (отказам узловых элементов), параметров моделируемых современных и перспективных сетевых устройств, а также способов их взаимодействия на сетевом (логическом) уровне (протоколов динамической маршрутизации с детерминированными алгоритмами выбора кратчайшего пути передачи пакетов, таких как, дистанционно-векторные и алгоритмы состояния связей), что *позволило* сократить временные затраты на моделирование сети более чем в 2 раза в сравнении с классической агрегативной моделью при расхождении расчетных и экспериментальных значений (данных натурных испытаний) пропускной способности сети менее 10 %.

2. Метод структурно-параметрической адаптации беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов к отказам сетевых элементов средней степени (физическое устранение от 10 до 30 % узловых элементов сети), *отличающийся* от известных методов адаптации, использующих изменение параметров радиointерфейсов сетевых устройств для уменьшения воздействия помех и повышения их пропускной способности, а также протоколы динамической маршрутизации на основе дистанционно-векторных алгоритмов и алгоритмов состояния связей, комплексным применением структурной (определение состава подсетей, использование в протоколах динамической маршрутизации поисковых процедур альтернативного выбора маршрута передачи данных в совокупности с расширенным ведением таблиц маршрутизации сетевых устройств) и

параметрической (в основном, динамическое изменение назначения пакетов, применение адаптивной процедуры выбора абонентским устройством беспроводной локальной подсети) адаптации, что *позволяет* формировать структуру сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при отказе до 24 % узловых элементов, что не менее чем в 10 раз больше пропускной способности системы связи, организованной с использованием известных методов адаптации.

3. Метод функциональной адаптации беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов к отказам сетевых элементов высокой степени (физическое устранение от 30 до 50 % узловых элементов сети), *отличающийся* от методов структурно-параметрической адаптации возможностью адаптивного изменения не только структуры сети и параметров ее элементов (сетевых устройств и каналов связи), но и функций сетевых устройств (функциональная замена выведенных из строя узловых элементов магистральной подсети узловыми элементами локальной подсети и наоборот) за счет использования многофункциональных радиотерминалов (беспроводных многофункциональных сетевых устройств), что *позволяет* формировать структуру сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при отказе до 40 % узловых элементов, что не менее чем в 2 раза больше пропускной способности системы связи, организованной с применением только структурно-параметрической адаптации.

4. Структура многофункционального устройства (радиотерминала на основе маршрутизатора) беспроводной адаптивной сети, *отличающаяся* от структур известных устройств связи с технологиями широкополосного радиодоступа совместным использованием динамической маршрутизации и коммутации пакетов, структурной, параметрической и функциональной адаптации к отказам узловых элементов, что *позволит* сократить время обработки информационных пакетов в телекоммуникационных устройствах более чем в 2,5 раза в сравнении с устройствами связи, функционирующих без применения комбинированной адаптации, и *обеспечить* требуемую пропускную способность сети.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Основные результаты и положения диссертации, выносимые на защиту, получены автором лично. В опубликованных работах автору совместно с сотрудниками (кандидатом технических наук И. В. Филипченко, В. Л. Макаровым, В. Э. Станкевичем, А. В. Хвисевичем, В. Е. Лазаренко, А. Р. Бекишем) научно-исследовательской лаборатории научно-исследовательской части УО «ВА РБ» определены методы математического моделирования беспроводной системы связи, синтеза адаптивной и экспериментальных исследований телекоммуникационной сети многофункциональной информационно-управляющей системы, функционирующих в условиях внешних преднамеренных воздействий, приводящих к отказам узловых элементов. Соавтором основных публикаций

является научный руководитель С. В. Кругликов, который определил цели, задачи и методы исследований, принял участие в обсуждении результатов исследований.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на: 10-й Международной научно-технической конференции учреждения образования «Белорусский национальный технический университет» (г. Минск, 2012 г.); семинаре «Разработка и внедрение современных средств связи, навигации и распознавания» Национальной академии наук Республики Беларусь (г. Минск, 2012 г.); 12-й и 13-й международных военно-технических конференциях учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» (г. Минск, 2013 г., 2015 г.); 17-й Республиканской научной конференции студентов и аспирантов учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины» (г. Гомель, 2014 г.); 31, 32 и 33-й ежегодных научно-технических конференциях, проводимых открытым акционерным обществом «АГАТ–системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» (г. Минск, 2014 г., 2015 г., 2016 г.); Международной научной конференции учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (г. Минск, 2014 г.); 17-й Международной научной конференции государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, 2018 г.).

Осуществлена апробация результатов диссертационного исследования:

при выполнении опытно-конструкторских работ, шифр «Полонез», в ОАО «АГАТ–системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» и «Разработать и поставить на производство радиотерминал системы передачи данных» в ОАО «АГАТ-СИСТЕМ»;

в ходе проведения учения Коллективных сил оперативного реагирования (КСОР) Организации Договора о коллективной безопасности (ОДКБ) «Взаимодействие–2013», проходившего с 16 по 27 сентября 2013 г.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты научных исследований опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных журналах общим объемом 2,1 авторских листа, в 3 иностранных научных изданиях общим объемом 1,5 авторских листа, а также в 11 других печатных работах (в 2 сборниках материалов научных конференций, 9 тезисах докладов).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа содержит введение, общую характеристику работы, основную часть в четырех главах, заключение, десять приложений.



Полный объем диссертации составляет 226 страниц, в том числе: 122 страницы основного текста, 39 иллюстраций на 24 страницах, 11 таблиц на 5 страницах, библиографический список из 111 наименований на 10 страницах, 10 приложений на 65 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В *первой главе* диссертации, основные положения которой опубликованы в [1-3, 7, 8, 11-14, 16, 18], при проведении аналитического обзора направлений развития систем связи, функционирующих в условиях отказов сетевых элементов, определено, что в качестве основного оборудования беспроводной ТКС с коммутацией пакетов целесообразно использование *сетевых устройств (СУ)* в составе *абонентских устройств (АУ)*, точек доступа в составе *локальных узлов (ЛУ)*, образующих *локальные подсети (ЛП)*, а также маршрутизаторов в составе *магистральных узлов (МУ)*, объединяющих ЛП в единую *транспортную составляющую (ТрС)* сети и обеспечивающих взаимодействие в составе *магистральной подсети (МП)* [1, 8, 11]. Передачу данных в модели ТКС между АУ целесообразно рассматривать по *логическим каналам связи*, входящим в состав *широкополосных каналов связи (ШКС)* [8].

С учетом принятой системы параметров (матрицы пропускных способностей ШКС  $S_{ТКС}$ , максимального числа одновременно действующих абонентов  $\max N_A$ , размера (площади) зоны обслуживания сети  $S_{ТКС}$  (при значении *вероятности ошибки на бит меньше допустимого*  $p_{ош} \leq p_{ош, доп}$ ), допустимого времени задержки пакетов в СУ  $\tau_{з, доп}$ ) для оценки эффективности функционирования беспроводной ТКС с коммутацией пакетов в качестве показателя выбрана ее средняя по логическим каналам связи пропускная способность (далее – *пропускная способность*) сети [2, 8].

Для повышения устойчивости функционирования ТКС в условиях отказов СУ возможно применение *комбинированных методов адаптации* (упорядоченного чередования *структурно-параметрических, функциональных методов адаптации*) [3, 7, 14]. В качестве основного метода имитационного моделирования системы связи выбран агрегативный подход, разработанный академиком Н. П. Бусленко и направленный на формализованное представление функций СУ, процессов их взаимодействия в составе ТКС [4, 9, 20, 21].

Во *второй главе* диссертационной работы, основные положения которой опубликованы в [4, 9, 12, 15, 20, 21], решалась задача имитационного моделирования функционирования беспроводной ТКС с коммутацией пакетов. *Имитационная модель* беспроводной ТКС с коммутацией пакетов формировалась в процессе проведения структурно-параметрического синтеза сети [17, 21].

В рамках *параметрического синтеза* сети рассматривалась совокупность полученных выражений [4, 9, 15, 20, 21]:

*модели абонентского устройства, описывающей конечный элемент ТКС:*

$$\mathbf{A}_{AY} = \mathbf{R}_{AY} * \left[ \mathbf{A}_{(AY)}^{(ПрмА)} \left( Z_{1A}^{(AY)}, Z_{2A}^{(AY)} \right) \times \mathbf{A}_{(AY)}^{(АП)} \left( Z_{пам}^{(AY)} \right) \times \mathbf{A}_{(AY)}^{(РА)} \left( Z_{рег}^{(AY)} \right) \times \mathbf{A}_{(AY)}^{(ПрдА)} \left( Z_{контр}^{(AY)} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}_{AY}$  – оператор сопряжения по входам и выходам агрегатов АУ;  $\mathbf{A}_{(AY)}^{(ПрмА)}$ ,  $\mathbf{A}_{(AY)}^{(АП)}$ ,  $\mathbf{A}_{(AY)}^{(РА)}$ ,  $\mathbf{A}_{(AY)}^{(ПрдА)}$  – агрегаты, моделирующие функционирование конечного устройства сети;  $Z_{1A}^{(AY)}$ ,  $Z_{2A}^{(AY)}$ ,  $Z_{пам}^{(AY)}$ ,  $Z_{рег}^{(AY)}$ ,  $Z_{контр}^{(AY)}$  – операторы состояний обработки информационных пакетов; « $\times$ » – знак прямого произведения множеств модели АУ, определяющий порядок подключения выходов (входов) смежных агрегатов; « $*$ » – знак композиции отношений множеств;

*модели локального узла, формализующей взаимодействие между ЛП и МП:*

$$\mathbf{A}_{ЛУ} = \mathbf{R}_{ЛУ} * \left[ \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАА)} \left( Z_{1i}^{(ЛУ)}, Z_{2i}^{(ЛУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(КА)} \left( Z_{5\text{лок}}^{(ЛУ)}, Z_{6\text{маг}}^{(ЛУ)}, Z_{7i}^{(ЛУ)}, Z_{8i}^{(ЛУ)}, Z_{9\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{10\alpha}^{(ЛУ)} \right) \times \right. \\ \left. \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАА)} \left( Z_{11i}^{(ЛУ)}, Z_{12i}^{(ЛУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАМ)} \left( Z_{3\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{4\alpha}^{(ЛУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАМ)} \left( Z_{13\alpha}^{(ЛУ)} \right) \right], \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_{ЛУ}$  – оператор сопряжения по входам и выходам агрегатов ЛУ;  $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАА)}$ ,  $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАМ)}$ ,  $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(КА)}$ ,  $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАА)}$ ,  $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАМ)}$  – агрегаты, моделирующие функционирование узлового элемента на базе сетевого коммутатора;  $Z_{1i}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{2i}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{3\alpha}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{4\alpha}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{5\text{лок}}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{6\text{маг}}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{7i}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{8i}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{9\alpha}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{10\alpha}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{11i}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{12i}^{(ЛУ)}$ ,  $Z_{13\alpha}^{(ЛУ)}$  – операторы состояний обработки информационных пакетов, поступающих как от зарегистрированных  $i$ -ых абонентских устройств, так и от  $\alpha$ -ых смежных узловых элементов (УЭ);

*модели магистрального узла:*

$$\mathbf{A}_{МУ} = \mathbf{R}_{МУ} * \left[ \mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прм)} \left( Z_{1\Theta}^{(МУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(МУ)}^{(Мрш)} \left( Z_{2пам}^{(МУ)}, Z_{3\Theta}^{(МУ)}, Z_{4\Theta}^{(МУ)}, M \left( Z_{(Мрш)}^{(МУ\Theta)} \Big|_{h=1, G} \right) \right) \times \mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прд)} \left( Z_{5\Theta}^{(МУ)} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}_{МУ}$  – оператор сопряжения по входам и выходам агрегатов МУ;  $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прм)}$ ,  $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Мрш)}$ ,  $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прд)}$  – агрегаты, моделирующие функционирование маршрутизатора;  $Z_{1\Theta}^{(МУ)}$ ,  $Z_{2пам}^{(МУ)}$ ,  $Z_{3\Theta}^{(МУ)}$ ,  $Z_{4\Theta}^{(МУ)}$ ,  $Z_{5\Theta}^{(МУ)}$  – операторы состояний обработки информационных пакетов, поступающих от  $\Theta$ -ых смежных УЭ (МУ или ЛУ);  $M \left( Z_{(Мрш)}^{(МУ\Theta)} \Big|_{h=1, G} \right)$  – алгоритм поиска кратчайшего пути между УЭ (ЛУ, МУ) ТКС;  $G$  – количество логических каналов связи между взаимодействующими АУ.

В моделях СУ адаптация к условиям функционирования сети раскрывается через операторы агрегатов [4, 9, 20, 21]: в модели АУ (выражение (1)) сглаживание колебаний трафика при приеме и передаче пакетов; в модели ЛУ (выражение (2)) с учетом выбранного приоритета производится параллельная обработка и определение последовательности выдачи пакетов; в модели МУ за счет использования детерминированных алгоритмов динамических

протоколов маршрутизации осуществляется выбор маршрута передачи пакетов в магистральной подсети (выражение (3)).

*Структурный синтез* включает определение состава, перечней типовых элементов, способов взаимодействия (связей) в подсетях, сети в целом [9, 21]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{ТКС}} &= \langle \mathbf{A}_{\text{адр}}, \mathbf{A}_W^{\text{ТКС}} \rangle * (\mathbf{M}_{\text{ОЛП}} \cup \mathbf{M}_{\text{МП}}), \\ \mathbf{M}_{\text{ОЛП}} &= \langle \mathbf{A}_{\text{ком.1}} \dots \mathbf{A}_{\text{ком.Л}} \rangle * \langle (\mathbf{A}_{\text{АУ1}}, \dots, \mathbf{A}_{\text{АУ}i}, \dots, \mathbf{A}_{\text{АУФ}}) \times (\mathbf{A}_{\text{ЛУ1}}, \dots, \mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta}, \dots, \mathbf{A}_{\text{ЛУЛ}}) \rangle, \\ \mathbf{M}_{\text{МП}} &= \langle \mathbf{A}_{\text{мрш.1}} \dots \mathbf{A}_{\text{мрш.Е}} \rangle * \langle \mathbf{A}_{\text{МУ1}} \times \dots \mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha} \times \dots \mathbf{A}_{\text{МУЕ}} \rangle, \\ W_{\text{эл } ij}(t) &= \min \langle \min W_{\text{ЛУ}}(t), \min W_{\text{МУ}}(t), \min C_{\text{шк}}(t) \rangle, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}_{\text{адр}}$  – адресная матрица, определяющая порядок взаимодействия АУ;  $\mathbf{M}_{\text{ОЛП}}$  – модель *объединенной локальной подсети (ОЛП)*, определяемая коммутационными матрицами ЛУ ( $\mathbf{A}_{\text{ком.1}} \dots \mathbf{A}_{\text{ком.Л}}$ );  $\mathbf{M}_{\text{МП}}$  – модель МП, определяемая маршрутными матрицами МУ ( $\mathbf{A}_{\text{мрш.1}} \dots \mathbf{A}_{\text{мрш.Е}}$ );  $\Phi$ ,  $\Lambda$ ,  $E$  – соответственно количество АУ, ЛУ и МУ в ТКС;  $\min W_{\text{ЛУ}}(t)$  и  $\min W_{\text{МУ}}(t)$  – минимальные пропускные способности ЛУ и МУ, выделяемые  $ij$ -му логическому каналу связи;  $\min C_{\text{шк}}(t)$  – минимальная пропускная способность ШКС с  $ij$ -м каналом; « $\cup$ » – знак объединения элементов подсетей;  $\mathbf{A}_W^{\text{ТКС}}$  – матрица пропускной способности ТрС ТКС [4, 9, 15, 20].

В процессе проведения эксперимента с разработанной моделью ТКС время моделирования уменьшается более чем в 2 раза в сравнении с классической агрегативной моделью, за счет сокращения количества используемых агрегатов, имитирующих ШКС, при соблюдении условия двухсвязности сети.

В *третьей главе* диссертации, основные положения которой опубликованы в [5, 7, 8, 10-12, 14], представлен структурно-параметрический синтез адаптивной ТКС, который основывается на комбинированном применении методов структурно-параметрической и функциональной адаптации, реализуемых с использованием многофункциональных сетевых устройств (МСУ) на базе маршрутизаторов, для достижения требуемой пропускной способности системы связи в зависимости от уровня (степени) отказов узловых элементов.

В целом, синтез АТКС включает:

1. Ввод исходных данных для проведения синтеза АТКС.
2. Построение беспроводной ТКС с коммутацией пакетов.
3. Расчет пропускной способности построенной ТКС  $\bar{W}_{\text{ТКС}}$  при известных данных о пропускных способностях логических каналов связи между АУ.
4. Выбор методов *комбинированной адаптации* при несоответствии значения  $\bar{W}_{\text{ТКС}}$  требуемому  $\bar{W}_{\text{ТКС тр}}$  с учетом уровня (степени) отказов УЭ.
5. Корректировка исходных данных для синтеза ТКС при условии превышения потребных ресурсов над имеющимися в ходе проведения адаптации.

6. Вывод результатов синтеза АТКС в виде множеств значений внутренних параметров СУ и характеристик структур подсетей.

Под ресурсными затратами проведения синтеза АТКС понимается использование необходимых количества УЭ и пропускных способностей ШКС для обеспечения информационного взаимодействия АУ при отказе СУ.

В процессе синтеза АТКС осуществляется [5, 10]:

параметрическая адаптация при низком уровне внешнего воздействия (отказе до 10 % УЭ от первоначального их количества);

структурная адаптация ТрС сети при среднем уровне внешнего воздействия (отказе от 10 % до 30 % УЭ);

функциональная адаптация сетевых устройств ТКС при высоком уровне внешнего воздействия (отказе от 30 % до 50 % УЭ) с учетом результатов проведения структурно-параметрической (комплексной) адаптации.

Параметрическая адаптация в элементах ТКС, основывающаяся на способах (алгоритмах) определения параметров СУ, проводится в основном с целью уменьшения последствий незначительного отказа УЭ. В качестве основных способов *параметрической адаптации* ТКС могут выступать: способ динамического изменения назначения пакетов (доля служебных данных изменяется в зависимости от выбора протоколов маршрутизации); адаптивная процедура выбора АУ беспроводной ЛП (абонентские устройства, регистрируются на том ЛУ, где обеспечивается наилучший прием радиосигнала) [5, 7, 10, 14].

Порядок проведения *структурной адаптации* с учетом параметрической включает способы определения рационального состава подсетей с целью замены вышедших из строя УЭ и восстановления целостности связей в ТрС сети. В качестве резервных УЭ могут применяться устройства, размещаемые как на мобильных наземных, так и воздушных объектах. При этом структурные изменения в МП должны обеспечить прохождение пакетов не менее чем по двум независимым маршрутам [10]. В рамках структурной адаптации для синтеза структуры перспективной АТКС предложена альтернативная адресация и маршрутизация, включающая поисковые процедуры (алгоритмы) выбора маршрута передачи пакетов [6].

*Функциональная адаптация* сетевых устройств ТКС проводится тогда, когда резервное количество УЭ исчерпано, а алгоритмы комплексной (структурно-параметрической) адаптации не позволяют обеспечить эффективную передачу пакетов между АУ. При этом для проведения функциональной адаптации выбирается группа тех СУ, где наименьшая пропускная способность элементарных (логических) каналов связи  $W_{эл\ ij}(t)$ .

Для повышения эффективности функционирования ТКС МИУС в условиях отказов УЭ, целесообразна разработка и применение *многофункциональных сетевых устройств (МСУ)* взамен разнотипных УЭ [7-9, 10].

С учетом методов комбинированной адаптации и применения МСУ выражения (1)-(4) синтеза АТКС примут следующий вид [9, 10]:

$$\left. \begin{aligned}
 \mathbf{A}_{AYi} \Big|_{i=1, \Phi} &= \mathbf{R}_{AYi} * \left[ \begin{array}{l} \mathbf{A}_{(AYi)}^{(ПрмА)} \left( Z_{1A}^{(AYi)}, Z_{2A}^{(AYi)} \right) \times \mathbf{A}_{(AYi)}^{(АП)} \left( Z_{пам}^{(AYi)} \right) \times \\ \times \mathbf{A}_{(AYi)}^{(РА)} \left( Z_{пер}^{(AYi)} \right) \times \mathbf{A}_{(AYi)}^{(ПрдА)} \left( Z_{контр}^{(AYi)} \right) \end{array} \right], \\
 \mathbf{A}_{МСУ\beta} \Big|_{\beta=1, N_{МСУ}} &= \mathbf{R}_{МСУ\beta} * \left[ \begin{array}{l} \mathbf{A}_{(МСУ\beta)}^{(ПрмАА)} \left( Z_{1i}^{(МСУ\beta)}, Z_{2i}^{(МСУ\beta)} \right) \times \mathbf{A}_{(МСУ\beta)}^{(Прм)} \left( Z_{1\Theta}^{(МСУ\beta)} \right) \times \\ \times \mathbf{A}_{(МСУ\beta)}^{(Мрш)} \left( Z_{2пам}^{(МСУ\beta)}, Z_{3\Theta}^{(МСУ\beta)}, Z_{4\Theta}^{(МСУ\beta)}, M \left( \mathbf{Z}_{(Мрш)}^{(МСУ\beta)} \right) \right) \times \\ \times \mathbf{A}_{(МСУ\beta)}^{(ПрдАА)} \left( Z_{11i}^{(МСУ\beta)}, Z_{12i}^{(МСУ\beta)} \right) \times \mathbf{A}_{(МСУ\beta)}^{(Прд)} \left( Z_{5\Theta}^{(МСУ\beta)} \right) \end{array} \right], \\
 \mathbf{M}_{ТКС} &= \left\langle \mathbf{A}_{ТКС}, \mathbf{A}_W^{ТКС} \right\rangle * \mathbf{M}_{ОЛП}, \\
 \mathbf{M}_{ОЛП} &= \left\langle \mathbf{B}_{МСУ.1} \dots \mathbf{B}_{МСУ.N_{МСУ}}, \mathbf{A}_{МНС}, \mathbf{A}_{ВК} \right\rangle * \left\langle \left( \mathbf{A}_{AY1}, \dots, \mathbf{A}_{AYi}, \dots, \mathbf{A}_{AY\Phi} \right) \times \right. \\
 &\quad \left. \times \left( \mathbf{A}_{МСУ1}, \dots, \mathbf{A}_{МСУ\beta}, \dots, \mathbf{A}_{МСУ.N_{МСУ}} \right) \right\rangle, \\
 W_{эл\ ij}(t) &= \min \left\langle \min W_{МСУ}(t), \min C_{шк}(t) \right\rangle,
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

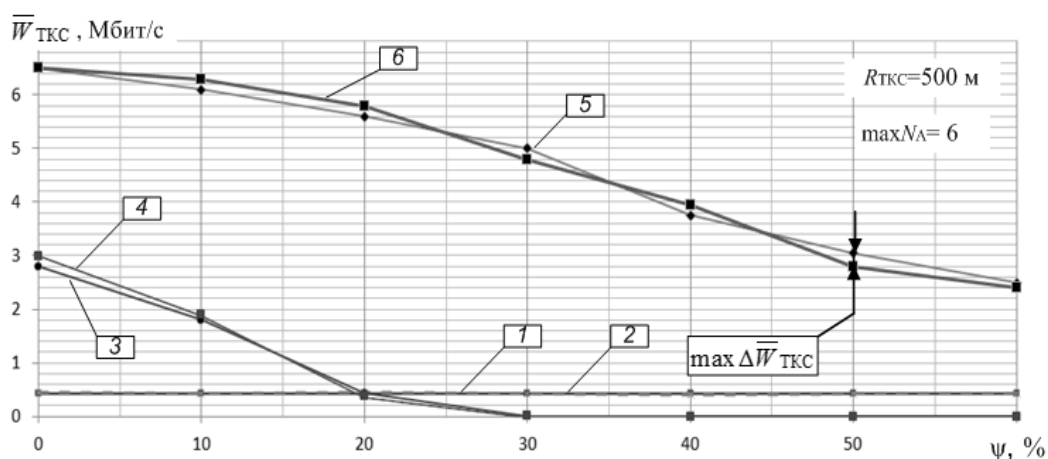
где  $\mathbf{A}_{МСУ}$  – агрегативная модель МСУ;  $\mathbf{R}_{МСУ}$  – оператор сопряжения по входам и выходам агрегатов МСУ;  $\mathbf{A}_{(МСУ)}^{(ПрмАА)}$ ,  $\mathbf{A}_{(МСУ)}^{(ПрдАА)}$  – агрегаты МСУ, обеспечивающие взаимодействие с АУ в режиме ЛУ;  $\mathbf{A}_{(МСУ)}^{(Прм)}$ ,  $\mathbf{A}_{(МСУ)}^{(Прд)}$  – агрегаты МСУ, обеспечивающие взаимодействие со смежными УЭ;  $\mathbf{A}_{(МСУ)}^{(Мрш)}$  – маршрутный агрегат, обеспечивающий коммутацию пакетов, как в сторону зарегистрированных АУ, так и в сторону смежных МСУ;  $Z_{1\Theta}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{2пам}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{3\Theta}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{4\Theta}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{5\Theta}^{(МСУ)}$  – операторы состояний маршрутной части МСУ;  $Z_{1i}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{2i}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{7i}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{8i}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{11i}^{(МСУ)}$ ,  $Z_{12i}^{(МСУ)}$  – операторы состояний локальной части МСУ;  $M \left( \mathbf{Z}_{(Мрш)}^{(МСУ)} \right)$  – адаптивный алгоритм распределения внутренних потоков пакетов в ТКС;  $\mathbf{B}_{МСУ}$  – матрица абонентов МСУ [5, 10];  $\mathbf{A}_{МНС}$  – блочная матрица местонахождения в сети [5, 10];  $\mathbf{A}_{ВК}$  – матрица весов ШКС [5, 10];  $\min W_{МСУ}(t)$  – минимальная пропускная способность множества МСУ, выделяемая  $ij$ -му элементарному (логическому) каналу связи.

В отличие от МУ (выражение (3)), в агрегативной модели выражения (5) маршрутный агрегат  $\mathbf{A}_{(МСУ)}^{(Мрш)}$  дополнен функцией коммутации пакетов между АУ смежной ЛП. В отличие же от ЛУ, в МСУ время, затрачиваемое для обработки

поступающих пакетов, может быть сокращено за счет использования альтернативных способов маршрутизации и параметрической адаптации [3, 7, 10].

В *четвертой главе* диссертации, основные положения которой опубликованы в [5, 6, 9, 10, 12, 16-19], приведены результаты экспериментальных исследований сети с существующими и многофункциональными СУ.

Для проверки адекватности и уточнения разработанной имитационной модели ТКС проводились натурные эксперименты по передаче видеосообщений в сегменте сети, состоящем из четырех ЛП в составе восьми АУ, объединяемых устройствами отечественного (маршрутизатор П-320, коммутатор П-215, радиостанции Р-180, Р-181, Р-187) и иностранного (радиомодем Bullet M2-HP) производства [6, 9, 18, 19]. В качестве объектов эксперимента рассматривались модели ТКС с децентрализованным, централизованным и комбинированным (смешанным) типами структуры системы связи. По результатам модельных экспериментов, представленных на рисунке 1, оценки пропускной способности ТКС в зависимости от уровня отказов УЭ практически совпадают (максимальное расхождение между теоретическими и эмпирическими данными  $\max \Delta \bar{W}_{\text{ТКС}}$  не превышало 10 %), что подтвердило адекватность разработанной имитационной модели системы связи [6, 9, 20]. Также было выяснено, что смешанный тип структуры ТКС малых размеров с технологиями ШРД позволяет обеспечить требуемую пропускную способность за счет применения параметрической адаптации, сокращающей время обработки пакетов в СУ более чем в 2,5 раза.

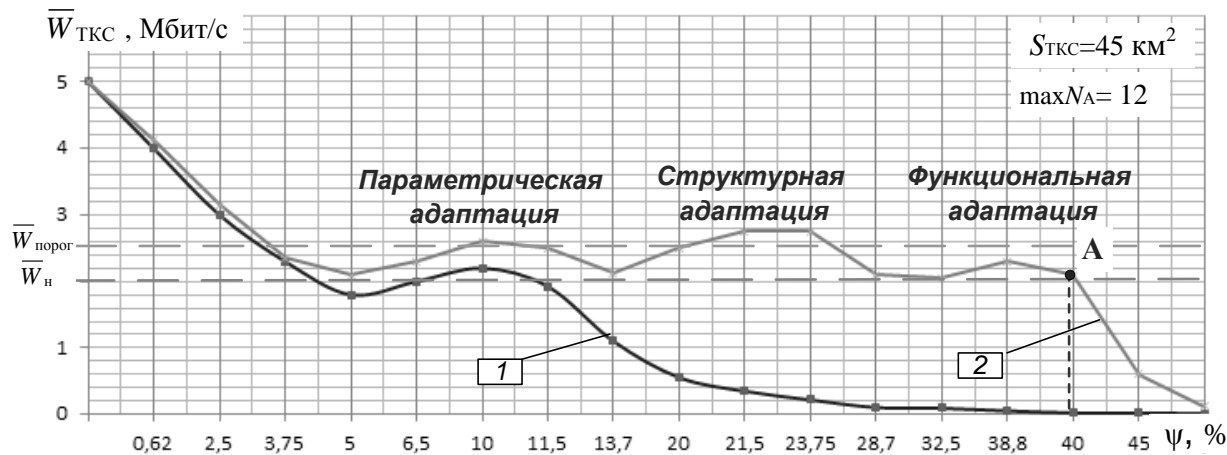


1, 3, 5 – математические модели децентрализованного, централизованного, смешанного типов структур ТКС соответственно; 2, 4, 6 – натурные модели децентрализованного, централизованного, смешанного типов структур ТКС соответственно

**Рисунок 1.** – Зависимости пропускной способности ТКС от уровня (степени) отказов УЭ для различных типов структур при  $\max N_A = 6$  и  $R_{\text{ТКС}} = 500$  м [6, 9]

Эффективность функционирования адаптивной системы связи на основе МСУ была оценена при проведении имитационного эксперимента с моделями существующей и АТКС с МСУ. Из результатов (рисунок 2) эксперимента видно, что АТКС средних размеров (до 60 АУ) в меньшей степени подвержена

отказам УЭ, чем ТКС, построенная на существующих СУ с известными методами адаптации. В АТКС сохраняется необходимая пропускная способность (2 Мбит/с) при выведении из строя до 40 % МСУ (точка А на рисунке 2) [5, 6, 10].



1 – модель ТКС с известными методами адаптации; 2 – модель АТКС с МСУ

**Рисунок 2. – Зависимости пропускной способности ТКС от уровня (степени) отказов УЭ при  $\max N_A = 12$  и  $S_{ТКС} = 45 \text{ км}^2$  [10]**

Из данных рисунка 2 следует, что применение комбинированной адаптации в ТКС позволяет существенно (в десятки раз) повысить пропускную способность системы связи за счет уменьшения (более чем в 2,5 раза) времени задержки обработки пакетов в МСУ при рациональном выборе операторов параметрической и функциональной адаптации сетевых устройств, а также использования альтернативной маршрутизации в ТрС сети в условиях высокой степени внешних воздействий (уровня отказов УЭ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. По результатам проведенного анализа построения многофункциональных информационно-управляющих систем, функционирующих в условиях внешних (вне сети) преднамеренных пространственных воздействий, для осуществления устойчивой передачи данных в реальном масштабе времени обосновано использование многоуровневых (наземно-воздушных) адаптивных беспроводных телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов на основе универсальных сетевых устройств (радиотерминалов) с функциями коммутаторов и маршрутизаторов [1, 2, 7, 8].

2. Разработана имитационная модель беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов, которая основывается на предложенном академиком Н. П. Бусленко агрегативном подходе описания функционирования сложных технических систем. Показано, что ключевым отличием представленной модели от

существующих является ее способность комплексного учета основных параметров каналов связи во внутренних операторах переходов агрегатов типовых устройств (абонентских устройств, локальных и магистральных узлов), состояний процесса адаптации к преднамеренным воздействиям (отказам узловых элементов), параметров моделируемых современных и перспективных сетевых устройств, а также способов их взаимодействия на сетевом (логическом) уровне (протоколов динамической маршрутизации с детерминированными алгоритмами выбора кратчайшего пути передачи пакетов, таких как, дистанционно-векторные и алгоритмы состояния связей). Применение разработанной модели позволило сократить за счет уменьшения количества используемых агрегатов, имитирующих широкополосные каналы связи, временные затраты на моделирование системы связи более чем в 2 раза в сравнении с классической агрегативной моделью при расхождении расчетных и экспериментальных значений пропускной способности сети не более 10 % [3, 4, 6, 9].

3. Разработан метод структурно-параметрической адаптации беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов к отказам сетевых элементов средней степени (физическое устранение от 10 до 30 % узловых элементов сети), который отличается от известных методов адаптации, использующих изменение параметров радиointерфейсов сетевых устройств для уменьшения воздействия помех и повышения их пропускной способности, а также протоколы динамической маршрутизации на основе дистанционно-векторных алгоритмов и алгоритмов состояния связей, комплексным применением структурной (определение состава подсетей, использование в протоколах динамической маршрутизации поисковых процедур альтернативного выбора маршрута передачи данных в совокупности с расширенным ведением таблиц маршрутизации сетевых устройств) и параметрической (динамическое изменение назначения пакетов, применение адаптивной процедуры выбора абонентским устройством беспроводной локальной подсети) адаптации. Метод позволяет формировать структуру сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при отказе до 24 % узловых элементов, что не менее чем в 10 раз больше пропускной способности системы связи, организованной с применением известных методов адаптации [5, 6, 10].

4. Разработан метод функциональной адаптации беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов к отказам сетевых элементов высокой степени (физическое устранение от 30 до 50 % узловых элементов сети), который отличается от методов структурно-параметрической адаптации возможностью адаптивного изменения не только структуры сети и параметров ее элементов (сетевых устройств и каналов связи), но и функций сетевых устройств (функциональная замена выведенных из строя узловых элементов магистральной



подсети узловыми элементами локальной подсети и наоборот). Метод функциональной адаптации может быть реализован за счет использования радиотерминалов (беспроводных многофункциональных сетевых устройств), которые позволяют формировать структуру сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при отказе до 40 % узловых элементов, что не менее чем в 2 раза больше пропускной способности системы связи, организованной с применением только структурно-параметрической адаптации [5, 10].

5. Получена структура многофункционального устройства (радиотерминала на основе маршрутизатора) беспроводной адаптивной сети, которая отличается от структур известных устройств связи с технологиями широкополосного беспроводного доступа совместным использованием динамической маршрутизации и коммутации пакетов, структурной, параметрической, а также функциональной адаптации к отказам узловых элементов. Внедрение радиотерминалов на основе маршрутизаторов позволит сократить время обработки информационных пакетов в телекоммуникационных устройствах более чем в 2,5 раза в сравнении с устройствами связи, функционирующих без применения комбинированной адаптации, и обеспечить требуемую пропускную способность сети [7-10].

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ**

олученная имитационная модель беспроводной телекоммуникационной сети может быть использована при модернизации существующих и разработке новых средств и комплексов связи с коммутацией пакетов для оценки с высокой достоверностью возможностей по обеспечению передачи информационных данных в реальном масштабе времени между элементами системы связи [4, 9].

2. Применение комбинированной адаптации телекоммуникационной сети к внешним преднамеренным воздействиям на уровнях сетевых устройств, локальных и магистральных подсетей с учетом внедрения передовых информационно-телекоммуникационных технологий позволяет решить следующие практические задачи [3, 7, 10]:

построение динамической структуры сети, обеспечивающей требуемую пропускную способность при высокой степени отказов узловых элементов;

определение оптимальных технических характеристик и режимов работы телекоммуникационного оборудования с использованием самоорганизации на уровне многофункциональных сетевых устройств;

выбор необходимого внутреннего протокола динамической маршрутизации для передачи различных сообщений с требуемым качеством обслуживания при

оптимальной загрузке сети служебной информацией и распределенном функционировании узловых элементов.

3. Практическая реализация параметрической адаптации в имеющихся локальных беспроводных сетях возможна за счет рационального выбора параметров протоколов физического и канального уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем, использования специальных сетевых технологий, что позволит значительно (более чем в 2,5 раза) сократить в существующих устройствах связи (например, полевых маршрутизаторах П-320, коммутаторах Ethernet П-215 в совокупности с каналообразующим беспроводным оборудованием Bullet M2-HP) время обработки информационных пакетов и обеспечить требуемую (более 2 Мбит/с) пропускную способность сети [6, 9].

Материалы об использовании (внедрении) полученных результатов:

1. Справка о практическом использовании результатов исследования в опытно-конструкторской работе «Разработать и поставить на производство радиотерминал системы передачи данных» от ОАО «АГАТ-СИСТЕМ» в 2019 г. Основной результат исследований – оценка возможности использования методов комбинированной адаптации к воздействиям внешних дестабилизирующих факторов для продвижения трафика по каналам связи УКВ диапазона.

2. Акт о практическом использовании результатов исследования при выполнении опытно-конструкторской работы, шифр «Полонез», от ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» в 2015 г. Основной результат исследований – увеличение пропускной способности проектируемых систем связи специального назначения за счет внедрения адаптивных сетей широкополосного радиодоступа.

3. Акт о практическом использовании результатов исследования в ходе учения КСОР ОДКБ «Взаимодействие–2013» от командования сил специальных операций Вооруженных Сил в 2013 г. Основной результат исследований – проверена возможность реализации комбинированной адаптации в телекоммуникационных сетях подразделений специального назначения.

4. Акт о реализации в учебном процессе УО «ВАРБ» результатов научно-исследовательской работы, шифр «Пилигрим», в 2018 г. Основной результат исследований – повышение скрытности, оперативности и эффективности управления специальными подразделениями за счет применения программно-аппаратных комплексов беспроводной сети передачи данных перспективной информационно-управляющей системы.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Зализко, А. Ю. Автоматизация процессов проектирования сети связи Вооруженных Сил / А. Ю. Зализко, С. В. Кругликов, В. Л. Макаров, И. В. Филипченко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 4 – С. 45–53.
2. Зализко, А. Ю. Определение системы параметров и показателей эффективности перспективной широкополосной беспроводной сети связи / А. Ю. Зализко, С. В. Кругликов, В. Э. Станкевич, И. В. Филипченко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 2 (39). – С. 91–100.
3. Зализко, А. Ю. Адаптация систем широкополосного абонентского радиодоступа военного назначения / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Наука и воен. безопасность. – 2013. – № 4 (40). – С. 22–28.
4. Зализко, А. Ю. Математическая модель перспективной военной системы широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 3 (44). – С. 86–97.
5. Зализко, А. Ю. Методика синтеза адаптивной перспективной сети широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко // Докл. БГУИР. – 2014. – № 6 (84). – С. 74–80.
6. Кругликов, С. В. Экспериментальные исследования подвижной сети широкополосного радиодоступа / С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 1. – С. 26–34.
7. Кругликов, С. В. Способы повышения устойчивости телекоммуникационной сети специального назначения к воздействию внешних дестабилизирующих факторов / С. В. Кругликов, И. В. Филипченко, А. Ю. Зализко // Вестник Академии военных наук. – 2018. – № 4 (65). – С. 141–153.
8. Кругликов, С. В. Структурно-функциональное построение телекоммуникационной сети многофункциональной информационно-управляющей системы специального назначения / С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко, А. В. Хвисевич, В. Е. Лазаренко // Веснік сувязі. – 2019. – № 1. – С. 58–64.
9. Кругликов, С. В. Модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / С. В. Кругликов, И. В. Филипченко, А. Ю. Зализко, А. Р. Бекиш // Информатика. – 2019. – № 1. – С. 58–74.
10. Кругликов, С. В. Синтез телекоммуникационной сети специального назначения с учетом воздействий внешних дестабилизирующих факторов /

С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. - № 2. – С. 33–45.

### **Материалы научных конференций**

11. Зализко, А. Ю. Теоритический подход к синтезу IP-сети широкополосного беспроводного доступа / А. Ю. Зализко // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XVII респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 24–25 марта 2014 г. / УО ГГУ им. Ф. Скорины; редкол. : Ф. В. Кадол (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 111–113.

12. Зализко, А. Ю. Имитационное моделирование адаптивной сети широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко, В. Э. Станкевич, И. В. Филипченко // Информационные технологии и системы 2014 (ИТС 2014) : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 29 окт. 2014 г. / УО «БГУИР»; редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2014. – С. 40–41.

### **Тезисы докладов**

13. Зализко, А. Ю. Автоматизация процессов проектирования и управления сетью связи Вооруженных Сил / А. Ю. Зализко, В. Л. Макаров, И. В. Филипченко // Белорккско-Российская науч.-практ. конф. по военно-техническому сотрудничеству : сб. тез. докл., Минск, 16–18 мая 2012 г. / УО «БНТУ», ГВПК; редком. : И. М. Быков (пред. ком.) [и др.]. – Минск, 2012. – С. 99–102.

14. Зализко, А. Ю. Адаптации в системах широкополосной беспроводной связи / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Современная военно-техническая политика : проблемы и перспективы : сб. тез. докл. Междунар. воен.-науч. конференции УО «ВАРБ», Минск, 21–22 марта 2013 г. / УО «ВАРБ»; отв. за выпуск Т. Я. Талейкина. – Минск, 2013. – С. 188.

15. Зализко, А. Ю. Математическая модель сети широкополосного радиодоступа военного назначения / А. Ю. Зализко // Сб. тез. 31 науч.-техн. конф. ГНПО «АГАТ – системы управления», Минск, 5–6 мая 2014 г. – Минск, 2014. – С. 76-77.

16. Зализко, А. Ю. Экспериментальные исследования адаптивной сети широкополосного радиодоступа военного назначения / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения : сб. тез. Междунар. воен.-науч. конф. УО «ВАРБ», Минск, 23–24 апр. 2015 г. / УО «ВАРБ»; отв. за выпуск Т. Я. Талейкина. – Минск, 2015. – С. 414.

17. Зализко, А. Ю. Полунатурный эксперимент адаптивной сети широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Сб. тез. 32 науч.-техн. конф. ОАО «Агат – системы управления» – управляющая компания

холдинга «Геоинформационные системы управления», Минск, 4–5 мая 2015 г. – Минск, 2015. – С. 45–46.

18. Зализко, А. Ю. Натурный эксперимент сегмента подвижной сети широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Сб. тез. 33 науч.-техн. конф. ОАО «Агат – системы управления» управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления», Минск, 2–3 мая 2016 г. – Минск, 2016. – С. 53.

19. Зализко, А. Ю. Практические исследования производительности сегмента подвижной сети широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко // Обеспечение военной безопасности государства : проблемы и перспективы : сб. тез. Междунар. воен.-науч. конф. УО «ВАРБ», Минск, 23–24 марта 2017 г. / УО «ВАРБ»; отв. за выпуск Т. Я. Талейкина. – Минск, 2017. – С. 207.

20. Зализко, А. Ю. Математическая модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / А. Ю. Зализко, С. В. Кругликов, И. В. Филипченко, В. Е. Лащаренко // РИНТИ–2018 : сб. тез. докл. Междунар. Конференции ГНУ «ОИПИ НАН РБ», Минск, 20 сент. 2018 г. / ГНУ «ОИПИ НАН РБ» : отв. за выпуск С. С. Мойсейчик – Минск, 2018. – С. 291–297.

21. Зализко, А. Ю. Подходы математического моделирования сетей передачи данных динамической информационно-управляющей системы / А. Ю. Зализко, С. В. Кругликов, И. В. Филипченко // РИНТИ–2018 : сб. тез. докл. Междунар. Конференции ГНУ «ОИПИ НАН РБ», Минск, 20 сент. 2018 г. / ГНУ «ОИПИ НАН РБ» : отв. за выпуск С. С. Мойсейчик – Минск, 2018. – С. 297–304.

## **МЕТАДЫ І СРОДКІ СТРУКТУРНА-ПАРАМЕТРЫЧНАЙ І ФУНКЦЫЯНАЛЬнай АДАПТАЦЫі БЕСПРАВОДНАЙ ТЭЛЕКАМУНІКАЦЫЙНАЙ СЕТКІ З КАМУТАЦЫЯЙ ПАКЕТАЎ ДА АДМОВЫ СЕТКАВЫХ ЭЛЕМЕНТАЎ**

*Ключавыя словы:* тэлекамунацыйная сетка, камутацыя пакетаў, прапускная здольнасць, адмовы элементаў, агрэгатыўная мадэль, структурна-параметрычная і функцыянальная адаптацыі, эксперымент.

*Мэта дысертацыйнага даследавання* – сінтэз бесправаднай тэлекамунацыйнай сеткі з камутацыяй пакетаў на аснове камбінаванага выкарыстання структурна-параметрычных і функцыянальных метадаў адаптацыі, якія забяспечваюць патрэбную прапускную здольнасць сеткі пры розных узроўнях (ступені) адмоў вузлавых элементаў.

*Метады даследавання:* сістэмны аналіз, метады матэматычнага і натурнага эксперыменту.

*Асноўныя навуковыя вынікі работы заключаюцца ў:* вызначэнні функцый і структуры бесправаднай тэлекамунацыйнай сеткі з камутацыяй пакетаў шматфункцыянальнай інфармацыйна-кіруючай сістэмы; распрацоўцы імітацыйнай мадэлі ў класе агрэгатыўных сістэм бесправаднай тэлекамунацыйнай сеткі, якая адрозніваецца ад вядомых комплексным улікам асноўных параметраў элементаў сеткі і спосабаў іх узаемадзеяння на лагічным узроўні; распрацоўцы метадаў структурна-параметрычнай і функцыянальнай адаптацыі сеткі да адмоў вузлавых элементаў, якія дазваляюць забяспечыць функцыянаванне сістэмы сувязі з патрабаванай прапускной здольнасцю з улікам прымянення шматфункцыянальных сеткавых прылад.

*Рэкамендацыі па выкарыстанні:* атрыманая імітацыйная мадэль сеткі з высокай дакладнасцю можа быць выкарыстана пры мадэрнізацыі існуючых і распрацоўцы новых сродкаў і комплексаў сувязі. Прымяненне камбінаванай адаптацыі ў сістэмах сувязі да адмоваў сеткавых элементаў, з улікам укаранення перадавых інфармацыйна-тэлекамунацыйных тэхналогій, дазволіць забяспечыць патрэбную прапускную здольнасць сеткі ў складаных умовах эксплуатацыі.

*Вобласць прымянення:* распрацоўка новых і ўдасканаленне існуючых тэлекамунацыйных сетак рознага прызначэння.

## РЕЗЮМЕ

Зализко Александр Юрьевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ К ОТКАЗАМ СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Ключевые слова:* телекоммуникационная сеть, коммутация пакетов, пропускная способность, отказы элементов, агрегативная модель, структурно-параметрическая и функциональная адаптации, эксперимент.

*Цель диссертационного исследования* – синтез беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов на основе комбинированного использования структурно-параметрических и функциональных методов адаптации, обеспечивающих требуемую пропускную способность сети при разных уровнях (степени) отказов узловых элементов.

*Методы исследования:* системный анализ, методы имитационного моделирования и натурного эксперимента.

*Основные научные результаты работы* заключаются в: определении функций и структуры беспроводной телекоммуникационной сети с коммутацией пакетов многофункциональной информационно-управляющей системы; разработке имитационной модели в классе агрегативных систем беспроводной телекоммуникационной сети, отличающейся от известных комплексным учетом основных параметров элементов сети и способов их взаимодействия на логическом уровне; разработке методов структурно-параметрической и функциональной адаптации сети к отказам узловых элементов, которые позволяют обеспечить функционирование системы связи с требуемой пропускной способностью с учетом применения многофункциональных сетевых устройств.

*Рекомендации по использованию:* полученная имитационная модель сети с высокой достоверностью может быть использована при модернизации существующих и разработке новых средств и комплексов связи. Применение комбинированной адаптации в системах связи к отказам сетевых элементов, с учетом внедрения передовых информационно-телекоммуникационных технологий, позволит обеспечить требуемую пропускную способность сети в сложных условиях эксплуатации.

*Область применения:* разработка новых и совершенствование существующих телекоммуникационных сетей различного назначения.

## SUMMARY

Alexander Zalizko

**METHODS AND MEANS OF STRUCTURALLY-PARAMETRICAL  
AND FUNCTIONAL ADAPTATION WIRELESS  
TELECOMMUNICATION NETWORK WITH SWITCHING OF  
PACKAGES TO REFUSALS OF NETWORK ELEMENTS**

*Keywords:* telecommunication network, switching of packages, throughput of a network, refusals of elements, aggregate model, structurally-parametrical and functional adaptations, experiment.

*The purpose of research* – synthesis of a wireless telecommunication network with switching of packages on the basis of combined use of structurally-parametrical and functional methods of the adaptation providing demanded throughput of a network at different levels (degree) of refusals of central elements.

*Methods of the research:* the system analysis, methods of imitating modeling and natural experiment.

*The main scientific results works consist:* in definition of functions and structures of a wireless telecommunication network with switching of packages of multipurpose information-operating system; to working out of imitating model in a class of aggregate systems of the wireless telecommunication network different from key parameters known for the complex account of elements of a network and ways of their interaction at logic level; to working out of methods of structurally-parametrical and functional adaptation of a network to refusals of central elements which allow to provide functioning of a communication system with demanded throughput taking into account application of multipurpose network devices.

*Recommendations for use:* the received imitating model of a network with high reliability can be used at modernization existing and working out of new means and communication complexes. Application of the combined adaptation in communication systems to refusals of central elements, taking into account introduction of the advanced information-telecommunication technologies, will allow providing demanded throughput of a network in difficult service conditions.

*Scope:* working out new and perfection of existing telecommunication networks various appointments.