

# Программный комплекс имитационного моделирования телекоммуникационных сетей

Ю.Г. Агалаков, В.П. Сурпин

**Аннотация.** Рассматриваются особенности реализации программного комплекса имитационного моделирования телекоммуникационных сетей с заданными жесткими требованиями к надежности и вероятностно-временным характеристикам. Описан разработанный программный комплекс, который значительно расширяет возможности существующих стандартных пакетов имитационного моделирования телекоммуникационных сетей.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные сети, имитационное моделирование.

## Введение

Предметной областью настоящей статьи являются телекоммуникационные сети критически важных автоматизированных систем управления [1, 25, 26], к которым предъявляются существенно более высокие, по сравнению с сетями общего пользования [7, 23], требования по безопасности, живучести, надежности и оперативности доставки информации [14-17]. Такие сети характеризуются «многопривязанностью» объектов, наличием трактов передачи данных, состоящих из каналов связи различной физической природы, использованием адаптивных и децентрализованных алгоритмов маршрутизации пакетов, сложными сценариями генерации входных потоков разноприоритетных сообщений. Размерность цифрового описания таких телекоммуникационных сетей несравненно выше размерности цифрового описания общедоступных сетей [2] и чрезвычайно быстро растет с ужесточением требований к их надежностным и вероятностно-временным характеристикам.

В процессе проектирования, создания и развития телекоммуникационных сетей необходимо принимать различные технические решения относительно их архитектуры, состава технических средств, выбора алгоритмов и протоколов функционирования. Основной путь принятия обоснованных решений - это предсказательное моделирование [19-21], позволяющее сравнивать различные варианты решений по значениям выбранных характеристик сетей, а также прогнозировать поведение сетей при различных режимах функционирования в различных внешних условиях.

Аналитические методы, как правило, не позволяют решать даже хорошо формализованные частные задачи моделирования сетей. Например, отсутствует строгое решение задачи оценивания времени доведения информации по сети в зависимости от параметров алгоритмов маршрутизации и управления потоками, а приближенные решения, основанные на потоковых моделях на сетях и графах [24], или сетях и системах массового обслуживания [5, 13, 18, 19, 27-30, 35, 36, 40, 41] позволяют, в лучшем слу-

чае, получить лишь качественные выводы о протекающих в сети процессах. Поэтому, основным механизмом предсказательного моделирования сложных систем является имитационное моделирование [30], для которого существуют развитые и апробированные технологии [4, 9, 11].

Имитационное моделирование является универсальным и мощным средством моделирования, но, в то же время, весьма «дорогостоящим» инструментом для исследования, так как в процессе проведения вычислительных экспериментов необходимо имитировать большое число сложных одновременно протекающих взаимосвязанных процессов. В последние годы стало активно развиваться новое направление математического моделирования - метамоделирование, в рамках которого рассматриваются математические модели, основанные на данных - результатах натурных и/или вычислительных экспериментов, проведенных с различными объектами или их моделями [6, 19-22, 39, 42, 45]. Построенные модели фактически имитируют (заменяют) исходные модели и, поэтому, их называют метамоделями (модели над моделями) или суррогатными моделями. Для построения таких метамodelей телекоммуникационных сетей можно использовать массивы данных - результатов вычислительных экспериментов с имитационными моделями телекоммуникационных сетей.

Для имитационного моделирования телекоммуникационных сетей существует ряд апробированных инструментов, таких как: NS-2, NS-3, OMNeT++, OPNET, QUALNET, GPSS, AnyLogic и др. Безусловно, многие процессы, протекающие в критически важных телекоммуникационных сетях (ТС KB), подобны процессам, протекающим в сетях общего пользования, и могут моделироваться с использованием стандартных инструментов [4, 9, 11]. Однако ТС KB имеют ряд существенных особенностей [1, 25, 26], которые не моделируются в рамках стандартных пакетов.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей построения имитационных моделей ТС KB и описание разработанного программного комплекса, позволяющего моделировать телекоммуникационные сети с заданными требованиями к их надежностным и вероятностно-временным характеристикам.

Описанный программный комплекс был использован в Опытно-конструкторской работе «Создание комбинированного имитационно-аналитического комплекса моделирования процессов функционирования сложных радиоэлектронных информационно-управляющих систем реального времени» (ОКР «Пядь»), выполняемой Научно-исследовательским институтом автоматической аппаратуры и Институтом проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН [25]. Этот комплекс был также использован в работе [3] для построения монтекарловских имитаторов сетей передачи данных и их использования для моделирования ИУС.

## 1. Особенности построения моделей ТС KB

Общедоступную сеть обычно рассматривают в виде неориентированного графа [7, 11, 23, 24, 26], вершины которого соответствуют центрам коммутации (ЦК) сети, а ребра - магистральным трактам передачи данных. К оконечным ЦК через абонентские тракты присоединяются абоненты сети.

В отличие от общедоступных сетей, ТС KB имеют ряд существенных особенностей, основные из которых перечислены ниже, и которые необходимо учитывать при создании имитационных моделей.

**Многопривязанность абонентов.** В ТС KB абоненты обычно подключаются одновременно к нескольким ЦК, что связано с необходимостью обеспечения надежной доставки критически важной информации через сеть за заданное время. Такой характер подключения абонентов существенно изменяет систему адресования в модели сети, которая теперь не может сводиться к адресованию абонентов через оконечные ЦК, и изменяет алгоритмы маршрутизации на промежуточных ЦК, которые должны учитывать многопривязанность абонентов. Моделирование сети в этом случае не может сводиться к моделированию только магистральной части, и модель должна описывать сеть графом, в который в качестве вершин входят не только ЦК, но и сами абоненты. При этом необходимо учитывать различный характер вершин графа: че-

рез абонентов не может осуществляться передача сообщений, им не предназначенных.

**Многоканальность трактов передачи данных.** Для обеспечения надежного информационного взаимодействия в ТС КВ, тракты передачи данных, связывающие ЦК между собой и с абонентами, обычно состоят из каналов связи различной физической природы, процессы передачи в которых зависят от среды распространения сигналов и ее состояния, отношения сигнал/шум и других параметров, и носит случайный характер [8, 12, 32, 34, 43]. Это приводит к необходимости моделирования отдельных магистральных и абонентских трактов передачи данных.

**Характер входных потоков.** При моделировании общедоступных сетей достаточно часто предполагают, что информационные потоки между абонентами носят случайный характер, а потоки между ЦК, порождаемые суперпозициями случайных абонентских потоков, можно считать независимыми. При таких естественных предположениях и отсутствии «выделенных» абонентов с трафиком, существенно превышающим трафик остальных абонентов, входные потоки на ЦК можно считать пуассоновскими [10]. Интенсивность потока между парой ЦК зачастую полагается пропорциональной произведению числа абонентов, подключенных к данным ЦК, и пропорциональной общей интенсивности входных потоков в сети. Общая интенсивность входных потоков в сети и количество абонентов являются варьируемыми параметрами моделей. Такие модели потоков обычно используется при моделировании общедоступных сетей [4, 9, 11].

В ТС КВ как правило циркулирует информация, имеющая различные приоритеты, к вероятностно-временным характеристикам доведения которой предъявляются различные требования. Поэтому информационные потоки в ТС КВ можно представить в виде суперпозиции фоновых потоков с неспецифической информацией и разноприоритетных потоков с критически важной информацией. Характер фоновых потоков близок к характеру потоков в общедоступных сетях и может описываться пуассоновскими моделями с переменной интенсивностью. Характер приоритетных потоков

определяется внешними сценариями генерации входных потоков и не может описываться простыми математическими моделями.

**Адаптивная маршрутизация.** В общедоступных сетях обычно отсутствуют жесткие требования к временам доведения сообщений, и, поэтому, широко используются алгоритмы фиксированной маршрутизации, при которых на каждом ЦК имеются так называемые «матрицы маршрутизации», указывающие в какой магистральный тракт направить сообщение с заданным оконечным ЦК. Матрицы маршрутизации рассчитываются централизованно, с использованием математических моделей потоков в сетях и соответствующих графовых алгоритмов оптимизации [24]. При изменении топологии сети матрицы маршрутизации централизованно пересчитываются.

В отличие от общедоступных сетей, многопривязанность абонентов в ТС КВ требует моделирования доставки сообщения не только до одного из оконечных ЦК, к которому привязан абонент-получатель, но и моделирования процессов передачи по соответствующему абонентскому тракту. В данном случае матрицы маршрутизации не определяют полностью маршруты передачи сообщений. Кроме того, необходимо также моделировать процессы обработки сообщений в ЦК.

В силу наличия разноприоритетных информационных потоков, необходимо строить маршруты передачи для сообщений с различными приоритетами, в силу чего маршруты передачи даже в адрес одного абонента-получателя сообщений с разными приоритетами могут быть различными.

Но главные различия между алгоритмами маршрутизации в общедоступных сетях и ТС КВ связаны с механизмами реагирования на процессы отказов и восстановления элементов магистральной сети (ЦК и магистральных трактов) и их неравномерно изменяющуюся во времени загрузку [1, 25, 26]. В силу наличия жестких требований к временам доведения приоритетных сообщений и к надежности характеристикам ТС КВ в целом, алгоритмы маршрутизации в ТС КВ должны в этих случаях обеспечивать оперативную децентрализованную перестройку маршрутизации всей сети.

Кроме того, в ТС KB обычно реализуются так называемые широковещательные алгоритмы маршрутизации для сообщений с критически важной информацией.

Для выбора оптимальных маршрутов на каждом ЦК необходима информация о текущем состоянии сети (ее топологии и загрузке ее элементов). Тем самым, в моделях ТС KB должны присутствовать механизмы обмена служебной информацией между ЦК, содержащей сведения об отказах и восстановлениях магистральных и абонентских трактов передачи данных, и о загрузке функционирующих элементов сети сообщениями разных приоритетов.

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к имитационным моделям ТС KB и реализующим эти модели программным комплексам:

- в процессе имитации должна варьироваться текущая топология сети, связанная с отказами и восстановлениями ее элементов в результате внешних воздействий, описываемых сценариями таких воздействий;
- в моделях должна учитываться многопривязанность абонентов к сети;
- общие модели сети должны включать в себя содержательные частные модели трактов передачи данных и входящих в них каналов связи;
- модели должны имитировать циркуляцию в сети суперпозиции низкоприоритетных фоновых потоков и разноприоритетных потоков, определяемых внешними сценариями входных потоков;
- модели должны имитировать процесс обмена служебной информацией между ЦК, содержащей сведения о текущем состоянии элементов сети;
- алгоритмы маршрутизации, реализуемые в моделях, должны быть адаптивными к изменению топологии и загрузки сети и децентрализованными;
- в моделях должны быть реализованы широковещательные алгоритмы маршрутизации и методы ограничения загрузки сети для разноприоритетных потоков.
- программные комплексы должны включать в себя специальные блоки планирования и обработки вычислительных экспериментов для

проверки гипотез о соответствии сети заданным требованиям к вероятностно-временным характеристикам доведения разноприоритетных сообщений при различных внешних сценариях.

Список характеристик функционирования сети обычно включает в себя как внутренние характеристики (загрузки ЦК и трактов передачи данных), так и внешние (пользовательские) характеристики (времена доведения сообщений), а также зависимости этих характеристик от времени и внешних параметров. Эти характеристики и зависимости в моделях общедоступных сетей фиксируются обычно только «в среднем». Так как ТС KB может использоваться как аналог общедоступной сети для обмена низкоприоритетной информацией, все усредненные показатели и зависимости для сети общего пользования также рассматриваются и оцениваются в моделях в качестве показателей функционирования.

Однако перечень оцениваемых характеристик в моделях ТС KB существенно шире и дополнительно включает в себя:

- времена доведения разноприоритетных сообщений, в том числе, времена доведения сообщений между выделенными группами абонентов, а также вероятности доставки сообщений за заданное время;
- характеристики живучести сети, определяемые зависимостями вероятностно-временных характеристик доведения от параметров внешних воздействий.

Реализовать сформулированные выше требования в существующих имитационных моделях сетей или построить адекватные имитационные модели ТС KB в рамках пользовательских библиотек специализированных пакетов моделирования телекоммуникационных сетей, таких как NS-2, NS-3, OMNeT++, OPNET, QUALNET, GPSS, AnyLogic оказалось невозможно.

Наиболее близкий к требованиям для моделей ТС KB функционал реализован в моделях пакета NS-3 с протоколами маршрутизации для ad-hoc сетей AODV [33], DSDV [37], DSR [38], OLSR [44]. Но, к сожалению, данные протоколы маршрутизации не позволяют реализовать важное для ТС KB требование многопривязанности абонентов. Большинство из них, также, не учи-

тывают разноприоритетность трафика, загрузку каналов связи или ЦК при прокладке маршрутов, либо делают это один раз и не реагируют далее на изменения свойств элементов сети.

В итоге, это определило необходимость разработки специального стека протоколов для моделей ТС КВ, а также разработки специфических модулей планирования, проведения и обработки вычислительных экспериментов. Вопросам построения специальных имитационных моделей ТС КВ и программного комплекса на их основе посвящен следующий раздел.

## 2. Программный комплекс имитационного моделирования ТС КВ

### 2.1. Общее описание

В качестве среды разработки выбран пакет AnyLogic, предоставляющий базовые средства для построения широкого спектра моделей – дискретно-событийных, агентных, аналитических. Как и пакет NS-3, пакет AnyLogic активно развивается, обладает современной архитектурой и высокопроизводительным ядром. В отличие от NS-3 AnyLogic имеет собственную инфраструктуру планирования, выполнения и анализа вычислительных экспериментов, развитый графический интерфейс на основе Eclipse, позволяющий создавать расширения, как с использованием графического редактора, так и непосредственно на языке программирования Java, а также возможность заимствования огромного количества специализированных программных модулей на языке Java. Платформонезависимость разрабатываемых с использованием этого инструмента моделей позволяет создавать и отлаживать модели на рабочих станциях под управлением Windows, а настроенные модели запускать с повышенной скоростью без графики на серверах и суперкомпьютерах под управлением Linux.

Программный комплекс имеет традиционную модульную структуру, включающую группу модулей входных параметров, группу модулей, реализующую имитационные модели ТС КВ, и группу модулей обработки и накопления результатов вычислительных экспериментов.

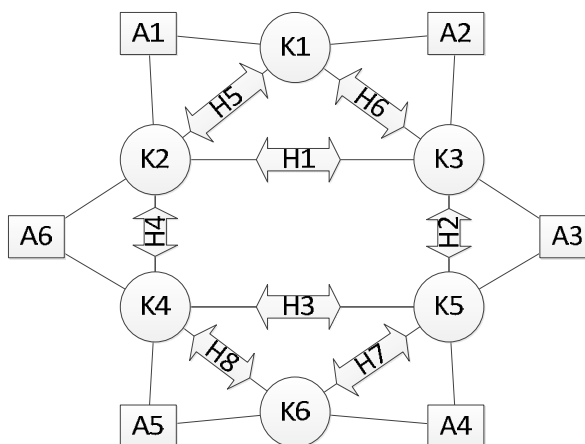


Рис. 1. Фрагмент модели телекоммуникационной сети

Топология сети задается в виде неориентированного графа, узлами которого являются сетевые устройства – ЦК и абонентские терминальные узлы, соединенные трактами передачи данных. При поступлении сообщения в ЦК, оно может быть передано в сеть по одному из ребер графа (вполне возможно, что и в обратном направлении), уничтожено либо реплицировано в несколько новых сообщений.

На Рис.1 приведен фрагмент модели телекоммуникационной сети. Символами A1 - A6 обозначены абонентские терминальные узлы (терминалы), K1-K6 – ЦК, H1 - H8 – магистральные тракты передачи данных. На фрагментах модели сети, подобных приведенному на Рис.1, возможна наглядная демонстрация свойств сети в процессе имитации.

Помимо основных сетевых объектов в процессе моделирования используются также вспомогательные и управляющие объекты. На Рис. 2 представлены данные компоненты, используемые для сопряжения со средой имитационного моделирования и управления моделью.

Терминал – это объект, отвечающий за выдачу пакетов в сеть и получение пакетов из сети от других терминалов. Терминал обладает сетевым адресом, который указывается в сетевом пакете при отправке и используется при маршрутизации в ЦК. У терминала есть единственный порт, который используется для отправки и приема сообщений. Через терминалы осуществляются сценарные генерации потоков сообщений.

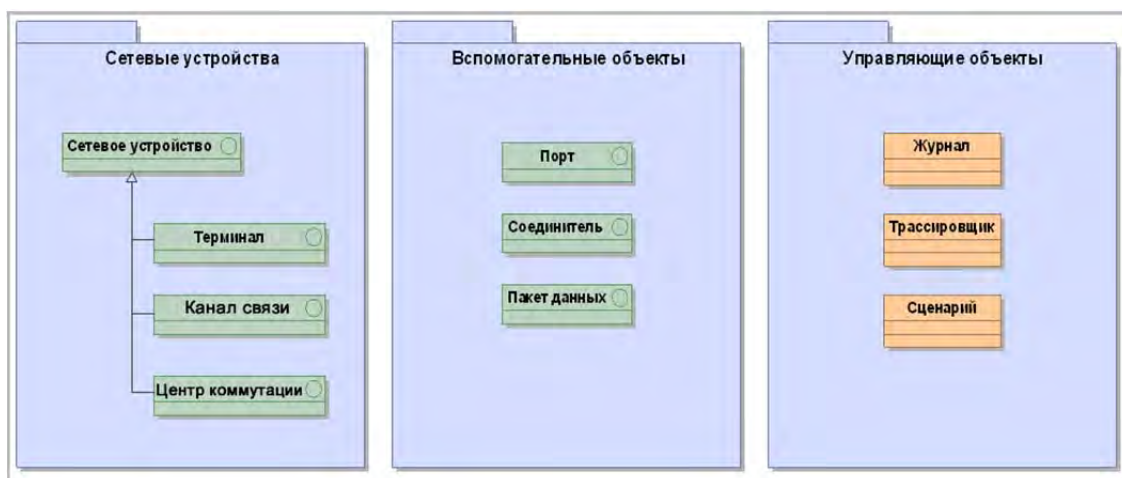


Рис. 2. Объектная модель телекоммуникационной сети

Особенностью объекта «Терминал» является поддержка многопривязанности абонентов. При соединении этого объекта с несколькими абонентскими трактами, заложенный в него алгоритм рассылки пакетов балансирует загрузку подсоединенных трактов (и каналов связи их составляющих) путем разделения трафика в долях, пропорциональных пропускным способностям каналов. Такая схема резервирования позволяет не только избежать простоя каналов связи, но и своевременно обнаруживать деградацию либо выход из строя каждого из каналов связи.

Тракт передачи данных состоит из набора каналов связи точка-точка и имеет два порта, к которым подсоединяются терминалы или цифровой канал (ЦК). С точки зрения модели, тракт передачи данных характеризуется случайным временем передачи пакета данных.

В программном комплексе используются несколько моделей каналов – вероятностная модель, модель радиоканала и цифрового канала. Вероятностная модель вносит задержку распространения пакета данных пропорционально длине пакета и помечает пакет как утерянный (неустраняемые ошибки при передаче) с фиксированной вероятностью, явно заданной пользователем. Модели радиоканала и цифрового канала связи учитывают физические характеристики аппаратуры приема-передачи – чувствительность, мощность, свойства среды – соотношение сигнал/шум, различные алгоритмы кодирования.

В ЦК реализована логика адаптивной маршрутизации сетевых пакетов, логика управления очередями с приоритетами, поддержка многоадресных сообщений. Маршрутизация пакетов осуществляется путем поиска кратчайшего по времени маршрута доставки пакета от текущего ЦК до терминала-получателя. Для построения маршрутного графа сети ЦК обмениваются информацией о состоянии своей загрузки и состоянии непосредственно подключенных к ним каналов связи.

Порт передачи данных – соответствует физическому или логическому сетевому интерфейсу сетевого устройства. Наличие данного объекта в модели определяется соображениями совместимости со средой имитационного моделирования. Каждое сетевое устройство в модели имеет один или более портов, которые могут быть соединены при помощи соединителей. Особенностью реализации используемого порта является возможность отправки сообщения подмножеству из всех подключенных к этому порту получателей.

Соединитель используется только для задания связей между портами и не является аналогом физического или логического канала связи или тракта передачи данных.

Пакет данных – это объект, который передается средой поддержки дискретно-событийного моделирования между портами сетевых устройств. С точки зрения модели существенными свойствами этого объекта являются: список адресов получателей, уровень приоритета,

длина пакета. Объект «Пакет данных» также имеет поля «Полезная нагрузка» и «Идентификатор пакета». Первое используется для интеграции со сторонними моделями, а второе – для работы управляющего объекта «Сценарий».

Управляющие объекты «Сценарий», «Журнал» и «Трассировщик» предназначены для управления сценариями имитационного моделирования, сбора данных моделирования и отладки моделей. Данные объекты поддерживают обмен сообщениями в рамках дискретно-событийной модели. Работу по реализации алгоритмов дискретно-событийного моделирования берет на себя среда имитационного моделирования, предоставляя данным объектам возможность реализовывать существенную для ТС КВ логику.

## 2.2. Модели сети передачи данных

Полагается, что тракты передачи данных состоят из набора  $n$  одновременно работающих каналов с пропускными способностями  $C_1, \dots, C_n$ . В случае выхода из строя одного из них абонентское оборудование связи и программная реализация стека сетевых протоколов перераспределяют нагрузку между оставшимися каналами связи. Выбор канала связи для отправки пакета выполняется на вероятностной основе, обеспечивающей равномерную загрузку всех каналов. Пакет будет отправлен через  $i$  – ый канал, удовлетворяющий условию:

$$(C_{i-1} \text{ или } 0) \leq x < (C_i \text{ или } 1),$$

где величина  $x$  случайно разыгрывается на отрезке  $(0; 1)$ , разделенном на интервалы, длины которых пропорциональны пропускной способности каждого канала.

Алгоритм управления очередями с приоритетами реализован в модели ЦК. Любой пакет перед отправкой в канал связи становится в очередь (FIFO, FirstIn – FirstOut), из которой в порядке следования пакетов выбираются

сначала пакеты высшего приоритета, затем на ступень ниже и т.д. Модель использует относительные приоритеты при передаче пакетов по каналам связи: если пакет высшего приоритета поступил в очередь после того, как началась передача пакета низшего приоритета, он будет оставаться в очереди до завершения начатой операции передачи.

В модели ЦК реализованы механизмы поддержки многоадресных сообщений, в том числе так называемых широковещательных (broadcast) сообщений. При поступлении в ЦК многоадресного сообщения он может направить его в соседний ЦК без изменений, либо реплицировать его в несколько сообщений, и направить их на различные соседние ЦК, исходя из требования минимизации времен доставки сообщения разным абонентам. При этом тело сообщения остается неизменным, а список адресов получателей модифицируется.

Наличие механизма репликации сообщений (особенно в широковещательном режиме) может вызывать лавинообразный рост загрузки сети и снижать качество ее работы. Поэтому, в моделях ЦК и Терминалов реализованы механизмы фильтрации, обеспечивающие уничтожение приходящих аналогичных сообщений после пришедшего первым. В моделях Терминалов использована также возможность ограничения входящего в сеть потока сообщений с градацией по приоритетам.

Схема поддержки процесса адаптивной децентрализованной маршрутизации представлена на Рис. 3.

Алгоритм работы процесса сбора локальных характеристик, выполняемый каждым ЦК, включает в себя следующие шаги:

- определение подключенных к портам ЦК внешних каналов связи;
- отправка в каждый канал связи инициирующего сообщения;

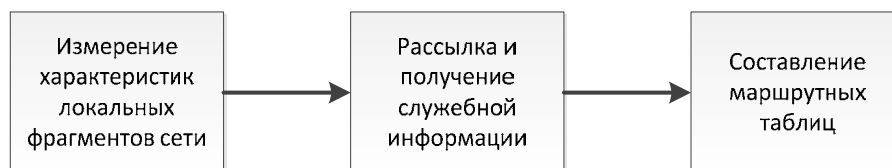


Рис.3. Процессы, поддерживающие адаптивную маршрутизацию

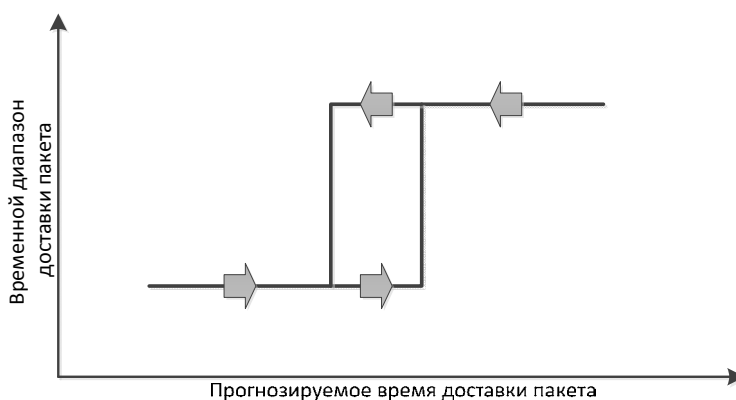


Рис.4. Схема сглаживания заполнения сети служебными пакетами

- запись в таблицу локальных данных адреса ответившего ЦК или абонента и нагрузочно-временных характеристик канала связи.

Данный процесс повторяется с заданной периодичностью (параметр «Время сбора локальной информации»).

Процесс рассылки и получения служебной информации также осуществляется с заданной периодичностью (параметр «Темп рассылки служебной информации»), а также при возникновении событий отключения и подключения каналов связи или при существенном изменении характеристик локального канала связи. Каждый ЦК делает широкоэвентральную рассылку собранной им локальной информации, а полученную от других ЦК информацию складывает в таблицу служебной информации для дальнейшего построения маршрутных таблиц. Служебные пакеты имеют наивысший приоритет.

Обычно критерием «существенности» изменения характеристик локального канала связи считается переход из одного заранее установленного временного диапазона доставки пакета в другой. Однако прямое использование в моделях такого критерия в случае изменения свойств каналов на границах диапазонов приводит к всплескам генерации потоков служебных сообщений. В худшем случае возможен эффект отрицательной обратной связи, когда снижение загрузки сети, обусловленное улучшением характеристик каналов связи, приводит к всплеску генерации потока служебных сообщений, который, в свою очередь, повышает загрузку сети. Для предотвращения подобных эффектов в моде-

лях используется смещенный по прогнозируемому времени доставки пакета порог переключения диапазонов при улучшении и ухудшении характеристик локального канала связи – своеобразный гистерезис (Рис. 4).

Построение маршрутных таблиц является заключительным процессом поддержки адаптивной маршрутизации. На основании данных, полученных на этапе рассылки и получения служебной информации, каждый ЦК формирует свое представление графа телекоммуникационной сети. Далее, с использованием соответствующих графовых алгоритмов оптимизации [24], находятся кратчайшие по времени маршруты доставки пакетов от данного ЦК до существующих терминалов. В результате, формируется таблица соответствия адресов получателей портам данного ЦК. При появлении пакета с заданным адресом по таблице устанавливается порт назначения и осуществляется пересылка. В некоторые моменты времени ЦК может не иметь достаточной информации для построения конкретного маршрута. В этом случае пакет становится в очередь перемаршрутизации и через заданное время выполняется попытка повторной маршрутизации пакета.

### 2.3. Структура программных модулей

В модуле описания структурных параметров задаются:

– топология ТС, включая количество ЦК, количество абонентских терминальных узлов, подключенных к ТС, количество каналов связи (КС) в трактах передачи данных;

- пропускные способности КС (имитационные модели КС);
- пропускные способности ЦК (имитационные модели ЦК);
- характеристики отказов ЦК и КС, вызванных техническими причинами.

В модуле описания функциональных параметров задаются:

- параметры пакетов данных, циркулирующих в сети;
- параметры протоколов маршрутизации, приоритетной обработки пакетов, ограничения загрузки, обмена служебной информацией.

*Модуль описания параметров внешних воздействий* специфицирует сценарии внешних воздействий на сеть с целью нарушения ее работы. Эти сценарии реализуются в виде коррелированных отказов элементов сети, приводящих к изменению ее структурных параметров. Программный комплекс позволяет проводить имитационные эксперименты при изменении структурных параметров сети в процессе моделирования.

*Модуль описания сценариев информационного взаимодействия* специфицирует сценарии входных информационных потоков (например, квазистационарный беспriorитетный поток (аналог сети общего пользования) или нестационарный поток разноpriorитетных пакетов, порождающий ответные потоки терминалов-получателей).

*Модуль генерации потоков между терминалами* формирует зависящие от времени матрицы тяготения в соответствии со сценариями, заданными в модуле описания сценариев информационного взаимодействия. На основе матриц тяготения генерируются потоки пакетов, каждый из которых идентифицируется набором атрибутов:

- время генерации;
- адрес терминала-отправителя;
- адреса терминалов-получателей;
- приоритет.

Атрибуты генерируются либо с помощью случайных механизмов, в соответствии с заданными распределениями интервалов времени между последовательно генерируемыми сообщениями, либо детерминированным образом в соответствии с заданными сценариями.

Особенность многоадресных пакетов состоит в том, что в момент генерации такие пакеты не разбиваются на совокупность одноадресных, а в том, что многоадресность сохраняется при движении пакета в сети. Модификация адресной части атрибутов и «размножение» пакетов может происходить в ЦК, когда для каждого адреса поступившего пакета выбирается независимый маршрут доведения. При этом возникающие новые пакеты содержат только часть адресов, для которых маршрут дальнейшего доведения одинаков.

В модуле генерации потоков также реализован механизм ограничения нагрузки. При угрозе переполнения сети входящими пакетами происходит ограничение интенсивности генерации пакетов, начиная с низкоpriorитетных.

*Модуль имитации передачи пакетов в КС* реализует несколько альтернативных вариантов:

- вариант подробной имитации с учетом выбранной модели искажения информации в канале;
- вариант использования математической модели для имитации задержки передачи;
- вариант использования метамодели для имитации задержки передачи.

*Модуль имитации передачи пакетов в трактах передачи данных* реализует процедуру выбора одного или нескольких КС для передачи пакета.

*Модуль имитации задержки пакетов при обработке в ЦК* также реализует несколько альтернативных вариантов имитации, аналогичных вариантам в модуле имитации передачи пакетов в КС.

*Модуль генерации служебной информации* инициирует сбор локальной информации и рассылает ее по сети.

*Модуль маршрутизации* реализует заданные алгоритмы маршрутизации. В этом блоке для каждого адреса, содержащегося в атрибутах поступившего в ЦК пакета, выбирается минимальный по времени маршрут доведения. Выбор наилучших маршрутов основан на решении оптимизационной задачи с использованием имеющейся сетевой информации о прогнозах времен задержек пакетов в КС и ЦК.

*Модуль ограничения нагрузки* реализует в каждом ЦК алгоритм приостановки обработки

пакетов, начиная с низкоприоритетных, при превышении заданного уровня загрузки элементов сети. При снижении загрузки сети, обработка пакетов возобновляется.

*Модуль управления функционированием имитационной моделью* реализует технологию диспетчеризации работы остальных модулей, выбирая для запуска очередной модуль в соответствии с «календарем событий». Одним из результатов работы данного модуля является модификация календаря событий путем включения в него новых событий, порожденных работой других функциональных модулей.

*Модуль сохранения результатов вычислительных экспериментов* выполняет запись результатов функционирования имитационной модели (времена задержек пакетов в элементах сети, величины загрузки элементов сети и т.п.) в базу данных результатов экспериментов. Степень детальности сохраняемой информации определяется задачами обработки результатов вычислительных экспериментов, решаемых в блоке обработки результатов вычислительных экспериментов.

*Модуль обработки результатов вычислительных экспериментов* вычисляет задаваемые пользователем характеристики функционирования сети, используя как стандартные программные блоки пакета AnyLogic, так и специфичные для требований к моделям ТС КВ блоки.

*База данных результатов экспериментов* содержит результаты проведенных экспериментов.

## Заключение

В работе рассмотрены вопросы, связанные с проектированием и программной реализацией комплекса имитационного моделирования телекоммуникационных сетей с заданными требованиями к надежности и вероятностно-временным характеристикам. Сформулированы требования к моделям таких сетей и выявлены те из них, которые не могут быть реализованы в стандартных пакетах имитационного моделирования. Разработан и описан программный комплекс имитационного моделирования таких телекоммуникационных сетей, выполненный в виде библиотеки для среды имитационного моделирования AnyLogic.

Разработанный комплекс имитационного моделирования позволяет моделировать телекоммуникационную сеть с десятками центров коммутации и сотнями абонентов, обменивающихся сообщениями по принципу «все со всеми». Для сети с пятью центрами коммутации, пятью абонентами, и количеством сгенерированных сообщений  $10^5$  время расчета основных характеристик сети составляет порядка трех минут на компьютере с современным процессором. В тех же условиях, суррогатная модель, построенная на основе результатов вычислительных экспериментов с построенной имитационной моделью, позволяет вычислять те же характеристики функционирования сети за время порядка 10 мс.

## Литература

1. Агалаков Ю.Г. Особенности моделирования телекоммуникационных компонентов автоматизированных систем управления. Информационные технологии и вычислительные системы. Вып. 2, 2014, С. 26–36.
2. Агалаков Ю.Г., А.В. Бернштейн А.В. Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования. Информационные технологии и вычислительные системы. Вып. 3, 2012, С. 3–17.
3. Агалаков Ю.Г., Бернштейн А.В., Кулешов А.П. Имитаторы сетей передачи данных при моделировании информационно-управляющих систем. Автоматика и Телемеханика, 2015 (в печати).
4. Алиев Т.И., Нгуен Дык Тай. Программный комплекс аналитического и имитационного моделирования сетей передачи данных. Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД–2007), т. II, с. 11–16.
5. Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. М.: Наука, 1989.
6. Бернштейн А.В., Кулешов А.П. Математические методы построения метамоделей. Труды Третьей международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2009, 14–18 сентября 2009 г., Звенигород, Россия). 2009, С. 756 – 768.
7. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. – 544 с.
8. Блох Э.Л., Турин В.Я., Попов О.В. Модели источников ошибок в каналах передачи цифровой информации. – М.: Связь, 1971.
9. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учебн. пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004.
10. Григелионис Б. И. Предельные теоремы для сумм процессов восстановления. Сб. «Кибернетика–на службу коммунизму», т.2, «Энергия», М.-Л., 1964, С. 246 – 265.

11. Гудов А.М., Семехина М.В. Имитационное моделирование процессов передачи трафика в вычислительных сетях. Управление большими системами. Вып. 31, 2010, С. 130–161.
12. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.
13. Жожикашвили В.А., Вишневский В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988.
14. Зацаринный А. А. Автоматизированные информационные системы как информационная и технологическая основа поддержки процессов выработки управленческих решений в интересах обеспечения пограничной безопасности // Экономика обороны и безопасности и аналитика: Сборник статей и докладов (по материалам общественных слушаний Комиссии Общественной палаты Российской Федерации) по проблемам национальной безопасности и социально-экономическим условиям жизни военнослужащих, членов их семей и ветеранов) / Под ред. д. филос. наук А. Н. Каньшина. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 114–120.
15. Зацаринный А. А. Аппаратура систем и комплексов обмена данными // История отечественных средств связи: Научное издание. – М.: Столичная энциклопедия, 2013. С. 501–506. 159.
16. Зацаринный А. А. Роль военной науки в создании, развитии систем и комплексов военной связи // История отечественных средств связи: Научное издание. – М.: Столичная энциклопедия, 2013. С. 455–459. 160.
17. Зацаринный А. А. Связь – основа управления войсками и силами // История отечественных средств связи: Научное издание. – М.: Столичная энциклопедия, 2013. С. 453. 161.
18. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1978.
19. Кулешов А.П. Метамоделли в компьютерных системах проектирования. Труды Международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (ИТММ, 19 – 26 сентября 2010 г., Франция). М.: Учреждение российской академии наук Центр информационных технологий в проектировании РАН, 2010. С. 209–210.
20. Кулешов А.П. Когнитивные технологии в адаптивных моделях сложных объектов. Информационные технологии и вычислительные системы. Вып. 1, 2008, с. 18 – 29.
21. Кулешов А.П. Технология быстрого вычисления характеристик сложных технических объектов. Информационные технологии. Вып. 3, 2006, С. 4–11.
22. Кулешов А.П. Интеграция данных и знаний при построении метамоделей. Труды Третьей международной конференция «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2009, 14–18 сентября 2009 г., Звенигород, Россия). 2009, С. 20 – 29.
23. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. Т.2. М.: Мир, 1975.
24. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981.
25. Мельников М.В. Технология комбинированного имитационно-аналитического моделирования информационно-управляющих систем, “Направления совершенствования автоматизированных систем управления”. Сборник статей молодежной научно-технической конференции 19–20 марта 2014 г. Ульяновск, с. 98–107.
26. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. Под ред. В. С. Семенихина. М.: Радио и связь, 1986.
27. Митрофанов Ю.И. Основы теории сетей массового обслуживания. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993.
28. Митрофанов Ю.И., Юдаева Н. В. Методы определения оптимальных параметров управления маршрутизацией в сетях массового обслуживания. Автоматика и телемеханика. № 8, 2001, с. 109–117.
29. Митрофанов Ю.И., Фокина Н.П. Анализ сетей массового обслуживания с динамическим управлением маршрутизацией. Известия Саратов. ун-та. Серия Математика. Механика. Информатика. Т. 7, 2007, с. 27–33.
30. Уоллэнд Дж. Введение в теорию сетей массового обслуживания. М.: Мир, 1993.
31. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем, искусство и наука. М.: Мир, 1978.
32. Эллиот. Оценка частотности ошибок при использовании кодов в каналах с пакетными помехами. В сб. переводов: Статистика ошибок при передаче цифровой информации. М.: Мир, 1966.
33. Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV), <https://www.nsnam.org/docs/models/html/aodv.html>
34. Berkovits S., Cohen E.L., Markov F. Chain Model for Tropospheric Scatter Links. Int. J. of Electronics. Vol. 26, No. 5, 1969.
35. Boucherie R.J., Van Dijk N.M. (Editors). Queueing networks: a fundamental approach. New York, Heidelberg, London : Springer Science + Business Media, LLC, 2011.
36. Dattatreya G. R. Performance Analysis of Queueing and Computer Networks. CRC Press/Taylor & Francis, Chapman & Hall/CRC computer and information science series. CRC Press/Taylor & Francis, 2008.
37. Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) routing protocol, <https://www.nsnam.org/docs/models/html/dsdv.html>
38. Dynamic Source Routing (DSR) protocol, <https://www.nsnam.org/docs/models/html/dsr.html>
39. Forrester, A.I.J., Sobester A., Keane A.J. Engineering Design via Surrogate Modelling. A Practical Guide. Wiley, New-York, 2008.
40. Heyman D.P. Modelling multiple IP traffic streams with rate limits / Heyman D.P., Lucantoni D. // IEEE / ACM Transactions on Networking. V. 11. P/ 948–958. 2003.
41. Klemm A. Modelling IP traffic using the batch Markovian arrival process / Klemm A., Lindermann C., Lohmann M. // Performance Evaluation. V. 54. P. 149–173. 2003.
42. Kuleshov A.P., Bernstein A.V. Cognitive technologies in adaptive models of complex plants. Information Control Problems in Manufacturing. 2009, Vol. 13, Part 1, pp. 1441 – 1452.
43. Mosen P. Fading channel communications. IEEE Communications Magazine. 1980, January, p. 16–25.
44. Optimized Link State Routing (OLSR) protocol, <https://www.nsnam.org/docs/models/html/olsr.html>
45. Wang G., Shan S. Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization. J. Mech. Des. 2007, 129(3), pp. 370–381.

**Агалаков Юрий Глебович.** Заместитель генерального директора АО "Гос МКБ "Вымпел". Окончил ЛГУ в 1986 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 40 печатных работ. Область научных интересов: информационные и телекоммуникационные технологии, моделирование. E-mail: yavalakov@gmail.com

**Сурпин Вадим Павлович.** Руководитель отдела АО Сбербанк-Технологии. Окончил Московский физико-технический институт в 2006 году. Кандидат технических наук. Область научных интересов: обработка больших данных (BigData). E-mail: vadim@iitp.ru