

# Особенности моделирования телекоммуникационных компонентов автоматизированных систем управления

Ю.Г. Агалаков

**Аннотация.** Рассматриваются особенности построения и моделирования телекоммуникационных сетей с заданными жесткими требованиями к надежностным и вероятностно-временным характеристикам. Отмечены те особенности, которые «эффективно» не моделируются в рамках стандартных имитационных технологий моделирования и которые необходимо учитывать для построения адекватных интегрированных моделей таких сетей.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы управления, сети передачи данных.

## Введение

Современные автоматизированные системы управления (АСУ) повсеместно используются в государственном управлении (на муниципальном, региональном и федеральном уровнях), при управлении бизнес-структурами, общественными организациями и во многих других областях деятельности. В статье мы будем рассматривать класс АСУ, таких как АСУ государственного управления федерального уровня, системы управления экологически опасными объектами, системы обеспечения ликвидации последствий масштабных чрезвычайных ситуаций и другие, которые предназначены для решения особо важных задач управления разнообразными ресурсами, технологическими процессами и оборудованием, функционируют в более жестких, а порой и критических, условиях по сравнению с традиционными АСУ, и к которым предъявляются существенно более жесткие требования по оперативности, безопасности, надежности и живучести. Для краткости, будем называть такие АСУ критически важными АСУ (АСУ-КВ).

АСУ КВ обычно представляют собой сложные территориально распределенные системы, включающие в свой состав комплексы программно-технических средств, телекоммуникационного оборудования, информационных ресурсов и взаимодействующих с ними и между собой многочисленных пользователей. В процессе своего функционирования АСУ КВ, как и другие территориально-распределенные АСУ, используют телекоммуникационную инфраструктуру, обеспечивающие обмен информацией между удаленными пользователями. В условиях развитой телекоммуникационной инфраструктуры общего пользования (например, сети ИНТЕРНЕТ) обычные АСУ могут не создавать собственные сети, а использовать общедоступные Сети Передачи Данных (СПД) общего пользования (СПД ОП). Именно таким образом функционируют многие АСУ, обеспечивающие информационный обмен между своими объектами (абонентами) и предоставляющие доступ к некоторым своим информационным ресурсам неопределенному кругу пользователей. Безусловно, имеющиеся обще-

доступные СПД ОП могут также использоваться и в АСУ КВ для передачи некритической информации, но публичные сети не могут обеспечить безопасной, оперативной, достоверной и надежной передачи критически важной информации. Поэтому высокие требования к качеству информационного взаимодействия в АСУ КВ приводят к необходимости создания в рамках АСУ КВ собственных телекоммуникационных подсистем, называемых далее для краткости Сетями Передачи Данных для АСУ КВ (СПД КВ). К СПД КВ, в отличие от телекоммуникационных сетей общего пользования (например, сети интернет), предъявляются существенно более высокие требования по безопасности, живучести, надежности и оперативности доставки информации, формулируемые в терминах вероятностно-временных и надежностных характеристик [1-3].

В процессе разработки и совершенствования АСУ необходимо принимать различные технические решения относительно архитектуры АСУ, выбора алгоритмов и протоколов функционирования, включая выбор различных их параметров, и т.п. Основной путь принятия обоснованных решений – это предсказательное моделирование, позволяющее сравнивать различные варианты решений по значениям прогнозируемых характеристик и прогнозировать поведение АСУ в различных режимах функционирования и внешних воздействий. В рамках моделирования АСУ КВ особенно важной и сложной задачей является моделирование телекоммуникационной подсистемы (СПД КВ), поскольку характеристики АСУ КВ в целом в значительной мере определяются именно характеристиками телекоммуникационной сети.

В силу сложности и многоаспектности реальных телекоммуникационных сетей, аналитические методы не позволяют решать даже хорошо формализованные частные задачи математического моделирования (например, задачи оценивания показателей функционирования сети в зависимости от параметров управления потоками). Использование для этих целей известных математических моделей (потокосовые модели на графах, сети массового обслуживания [2, 4 - 13]) позволяют в лучшем случае получить лишь качественные выводы о проте-

кающих в сети процессах. Поэтому, в настоящее время основным механизмом предсказательного моделирования телекоммуникационных сетей является имитационное моделирование [14].

Существуют развитые и апробированные технологии имитационного моделирования сетей [15-17]. Безусловно, в силу своего исходного назначения, многие процессы, протекающие в СПД КВ, подобны процессам, происходящим в СПД ОП, и могут моделироваться с использованием стандартных технологий моделирования. Однако телекоммуникационные сети с заданными жесткими требованиями к надежности и вероятностно-временным характеристикам доставки информации имеют ряд существенных особенностей по сравнению с общедоступными сетями, которые необходимо учитывать при моделировании и которые не позволяют использовать стандартные модели и пакеты моделирования сетей.

Целью данной статьи является анализ особенностей построения и функционирования СПД КВ, являющихся телекоммуникационными компонентами АСУ КВ, и выявление тех особенностей, которые не моделируются в рамках стандартных технологий моделирования и которые нужно непременно учитывать при построении адекватных предсказательных моделей сетей и имитаторов на их основе.

## **1. Особенности построения и функционирования моделей сетей передачи данных**

### **1.2. Перечень параметров моделей**

При создании модели произвольной СПД и проведении вычислительных экспериментов с созданной моделью необходимо определить (выбрать) следующие общие параметры (характеристики) модели:

- структура моделируемой сети;
- структура информационных потоков, циркулирующих в сети;
- базовые алгоритмы и протоколы, реализованные в сети и отражаемые в модели;
- перечень варьируемых параметров в модели сети;

- список характеристик функционирования сети и зависимостей, которые должны быть оценены в результате вычислительных экспериментов.

### 1.2. Структура моделируемых сетей

СПД ОП представляют собой совокупность центров коммутации (ЦК), связанных магистральными трактами передачи данных, к которым по абонентским трактам присоединяются абоненты сети. Такая структура сети определяет иерархическую систему адресования, при помощи которой в процессе передачи информации по сети достаточно идентифицировать и использовать при маршрутизации только оконечный ЦК, к которому подключен абонент-получатель информации, и лишь на оконечном узле идентифицировать абонентский тракт. В такой структуре при моделировании сети можно считать, что сами ЦК являются источниками и получателями информации.

При обычной унификации аппаратно-программных средств в общедоступной сети можно считать, что имеется небольшое число типов ЦК, различающихся пропускной способностью и количеством одновременно подключаемых трактов передачи данных. Номенклатура магистральных трактов передачи данных в общедоступной сети также обычно невелика.

Поэтому, при моделировании достаточно рассматривать общедоступную сеть в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют ЦК сети, а ребра соответствуют магистральным трактам передачи данных между соответствующими ЦК. При этом достаточно использовать небольшое число различных моделей, описывающих различные ЦК и магистральные тракты передачи данных.

В отличие от общедоступных сетей, в СПД КВ часть абонентов зачастую подключаются одновременно к нескольким ЦК, что связано с необходимостью обеспечения надежной доставки критически важной информации через сеть за заданное время. Такой характер подключения абонентов определяет ряд важных особенностей, которые необходимо отражать в моделях. Прежде всего, система адресования в модели сети не может сводиться к адресованию абонентов через оконечные ЦК, и алгоритмы

маршрутизации на «промежуточных» ЦК должны учитывать «многопривязанность» абонентов. Поэтому, моделирование сети не может сводиться к моделированию только магистральной части сети, и модель должна описывать сеть графом, в который входят не только ЦК, но и сами абоненты. При этом необходимо учитывать различный характер вершин графа: через абонентов не может осуществляться передача (коммутация) сообщений, им не предназначенных.

Для обеспечения надежного информационного взаимодействия, в тракты передачи данных входят обычно каналы связи различной физической природы, часть из которых являются аналоговыми и могут иметь характеристики, существенно меняющиеся в зависимости от состояния внешней среды, вплоть до полной их деградации. Это приводит к необходимости моделировать отдельные магистральные и абонентские тракты передачи данных, используя либо имитационные модели для различных каналов связи, либо метамоделей [18 - 20], построенные по результатам предварительно проведенных вычислительных экспериментов с имитационными моделями.

Эти факты отражают одно из принципиальных различий между моделированием общедоступных СПД ОП и рассматриваемых СПД КВ.

### 1.3. Структура информационных потоков, циркулирующих в сети

В общедоступных сетях СПД ОП, ориентированных на неопределенный круг абонентов, невозможно определить мотивацию возникновения информационных потоков между абонентами сети, идентифицировать характер передаваемой информации и предсказать, какой ответный поток информации от абонента вызовет полученное им сообщение. Поэтому при моделировании общедоступной сети достаточно предполагать, что потоки между абонентами носят случайный характер, а потоки между ЦК, являющиеся суперпозициями случайных абонентских потоков, можно считать независимыми. Кроме того, можно предположить, что не существует «выделенных» абонентов сети, интенсивность входящих потоков от которых существенно превышает интенсивности входящих

щих потоков от других абонентов. При таких естественных предположениях выполняются условия центральной предельной теоремы о суперпозиции потоков [21], и входные потоки на ЦК можно считать пуассоновскими.

Матрицы интенсивностей потоков (называемые также матрицами тяготения) между различными парами ЦК определяются суперпозицией потоков между абонентами. Простейшим предположением, достаточно часто используемым при моделировании общедоступной сети, является предположение, что для данного абонента ЦК подключения его корреспондентов равновероятно выбираются среди всех ЦК. Отсюда следует, что интенсивность потока между парой ЦК пропорциональна произведению числа абонентов, подключенных к данным ЦК, и пропорциональна общей интенсивности входных потоков в сети. Общая интенсивность входных потоков в сети обычно периодически изменяется во времени (по часам в течение суток, по дням недели, по месяцам) и обычно определяется по статистике входных потоков. Именно такие модели потоков обычно используются при моделировании СПД ОП [15-17].

В СПД КВ циркулирует информация разного типа, имеющей разные приоритеты и к доставке которой предъявляются различные требования к вероятностно-временным характеристикам доведения. Тем самым, при моделировании СПД ОП необходимо иметь совокупность моделей, описывающих входные потоки информации, имеющей разные приоритеты.

Информационные потоки в СПД КВ можно условно разделить на два класса. Абоненты АСУ КВ используют СПД КВ как для обмена «повседневной» неспецифической информацией, так и для передачи критически важной информации, определяемой функционированием АСУ КВ в соответствии с ее задачами, для которой потоки с неспецифической информацией имеют характер фоновых потоков.

Тем самым, в СПД КВ информационные потоки между абонентами представляют собой суперпозицию информационных потоков двух типов:

- фоновые низкоприоритетные информационные потоки с неспецифической информацией,
- высокоприоритетные информационные потоки с критически важной информацией.

Характер фоновых низкоприоритетных потоков близок к характеру информационных потоков в общедоступных сетях, поэтому такие потоки могут описываться пуассоновскими моделями с переменной интенсивностью.

Однако высокоприоритетные информационные потоки с критически важной информацией определяются сценариями развития ситуации в АСУ КВ и не могут описываться простыми математическими моделями.

В общем виде сценарий развития ситуации в АСУ КВ определяет последовательность внешних событий, на которые «реагирует» АСУ КВ (дальнейшие события могут определяться также действиями, предпринимаемыми в результате реагирования АСУ КВ). Каждое произошедшее событие порождает конкретный поток сообщений, отправляемый от одних конкретных абонентов к другим абонентам, и эти сообщения идентифицируются некоторыми смысловыми идентификаторами. При получении каждого сообщения, каждый абонент в соответствии со своим сценарием реагирования на полученные сообщения с конкретными смысловыми идентификаторами порождает свой поток сообщений с другими смысловыми идентификаторами в адрес других конкретных абонентов. Сценарии реагирования абонентов могут носить стохастический характер и имитироваться с помощью моделей, внешних по отношению к моделям сети.

Такой характер информационных потоков, циркулирующих в сети, в виде суперпозиции низкоприоритетных фоновых потоков, описываемых пуассоновскими моделями, и высокоприоритетных информационных потоков, определяемых содержательными сценариями функционирования АСУ КВ и реализуемых в виде внешних сценарных моделей, является вторым принципиальным различием между моделированием общедоступных СПД ОП и рассматриваемых СПД КВ.

#### **1.4. Базовые алгоритмы и протоколы, реализуемые в модели сети**

В общедоступных СПД ОП обычно отсутствуют жесткие требования к временам доведения сообщений, и, поэтому, обычно используются алгоритмы фиксированной маршрутизации. На

каждом ЦК имеются так называемые «матрицы маршрутизации», указывающие в какой магистральный тракт направить сообщение с заданным конечным ЦК. Матрицы маршрутизации основаны на модели магистральной сети в виде ориентированного графа и рассчитываются централизованно, с использованием математических моделей потоков в сетях и соответствующих графовых алгоритмов оптимизации [4]. При изменении топологии сети (появлении новых ЦК или магистральных трактов передачи данных) матрицы маршрутизации пересчитываются централизованно.

В отличие от общедоступных сетей, «многопривязанность» абонентов в СПД КВ требует моделирования доставки сообщения не только до одного из конечных ЦК, к которому привязан абонент-получатель, но и моделирование передачи по соответствующему абонентскому тракту. Это накладывает следующие требования к моделям СПД КВ: маршрутизация на ЦК должна учитывать многопривязанность абонентов, и матрицы маршрутизации для доведения информации до ЦК не определяют полностью маршруты дальнейшей передачи.

Потоки между объектами АСУ КВ состоят из сообщений с разными смысловыми идентификаторами, к которым предъявляются разные требования к их вероятностно-временным характеристикам доведения. Поэтому информационные потоки между абонентами имеют разноприоритетный характер, определяющий приоритетность их обслуживания в элементах сети. Поэтому телекоммуникационная сеть, как и имитирующая ее модель, должны реализовывать приоритетную обработку сообщений, а маршруты передачи разноприоритетных сообщений даже в адрес одного абонента-получателя могут быть различными.

Но главное отличие между алгоритмами маршрутизации в СПД ОП и СПД КВ, которые обязательно должны отражаться в моделях, являются механизмы реагирования на неравномерную загрузку элементов магистральной сети (ЦК и магистральных трактов), которая может быстро и существенно изменяться с течением времени, и на процессы кратковременных отказов и восстановлений этих элементов.

Так как в СПД ОП отсутствуют жесткие требования к временам доведения информации,

то отсутствуют механизмы реагирования на изменяющуюся загрузку элементов сети, существенно влияющую на времена доведения информации. При кратковременных отказах конкретных ЦК или магистральных трактов передачи данных в СПД ОП обычно не используются адаптационные механизмы, оперативно реагирующие на изменение топологии магистральной сети. Так как отказы достаточно надежного оборудования носят редкий и одиночный характер, связанный с техническими причинами, то некоторое время сеть «не реагирует» на кратковременное изменение топологии, что приводит к увеличению нерегламентированного времени доставки некоторых сообщений. Если отказавшие компоненты сети не восстановлены за заданное время, то централизованно пересчитываются матрицы маршрутизации, и далее сеть функционирует в изменившейся топологии.

В силу жестких требований к надежности и временам доведения приоритетных сообщений, алгоритмы маршрутизации в СПД КВ должны «мгновенно» реагировать как на изменение своей структуры, связанной с отказами и восстановлениями элементов магистральной сети, так и на меняющуюся загрузку этих элементов, и оперативно перестраивать свою маршрутизацию. Это особенно важно, так как, в отличие от общедоступных сетей, в которых отказы элементов сетей связаны, как правило, с техническими причинами, в СПД КВ отказы могут носить коррелированный характер в результате внешних по отношению к АСУ КВ воздействий (природных или целенаправленных).

В случае «централизованной маршрутизации» существенно снижается степень адаптации маршрутизации к реальной обстановке на сети, а при отказе гипотетического центра управления сетью, на котором происходит централизованный пересчет маршрутов, сеть просто не будет реагировать на состояние сети, что может привести к большой задержке доведения или к недоставке даже критически важной высокоприоритетной информации.

Поэтому перестройка маршрутов доведения информации в СПД КВ должна носить децентрализованный характер и выполняться на каждом ЦК автономно. Для выбора оптимальных

маршрутов на каждом ЦК необходима информация о текущем состоянии сети (ее топологии и загрузке ее элементов). Эта информация на конкретном ЦК включает в себя не только информацию об отказавших трактах передачи информации и об отказах ЦК, подключенных к этому ЦК (такая информация на КЦ естественно есть), но и информацию об отказах других трактов и ЦК. Тем самым, в СПД КВ должны присутствовать механизмы обмена внутренней (служебной) информацией между ЦК, содержащей сведения об отказах и восстановлениях магистральных и абонентских трактов передачи данных, а также о загрузке функционирующих элементов сети сообщениями разных приоритетов. Так как скорость доведения и детальность служебной информации существенно влияют на качество маршрутизации и, как следствие, на вероятностно-временные характеристики информационного обмена в АСУ КВ, механизмы формирования и доведения служебной информации должны найти отражение в моделях СПД КВ.

Вышесказанное определяет следующие требования к моделям СПД КВ:

- маршрутизация в модели должна учитывать многопривязанность абонентов, и матрицы маршрутизации для доведения информации до ЦК не определяют полностью маршруты дальнейшей передачи;
- модель должна обеспечивать приоритетную обработку сообщений в элементах сети;
- модель должна имитировать процесс обмена служебной информацией между ЦК, содержащей сведения о текущем состоянии (отказах и восстановлениях магистральных и абонентских трактов передачи данных и загрузке функционирующих трактов передачи данных);
- методы маршрутизации, реализуемые в модели, должны быть адаптивными и децентрализованными. В моделях должны реализовываться различные алгоритмы маршрутизации для сообщений с разными приоритетами, находить различные маршруты передачи разноприоритетных сообщений даже в адрес одного абонента-получателя и моделировать очереди на передачу сообщений с разными приоритетами. Наличие в одном тракте передачи данных

каналов связи с существенно разными характеристиками требует от алгоритма маршрутизации не только выбора тракта дальнейшей передачи сообщения, но и выбора конкретного канала в тракте;

- при высокой загрузке в модели должны быть реализованы методы ограничения нагрузки, заключающиеся в том, что при высокой загрузке сети окончательные ЦК временно ограничивают потоки входных сообщений определенной приоритетности от абонентов-отправителей.

Эти требования к модели определяют третье принципиальное различие между моделями общедоступных и рассматриваемых сетей.

### 1.5. Моделирование текущей топологии

Обычно в процессе проведения вычислительных экспериментов с моделями общедоступных сетей варьируются только матрицы входных потоков, а в большинстве случаев варьируется только суммарная интенсивность, входящая скалярным множителем в фиксированные матрицы входных потоков. Если предметом исследования не является выбор «оптимальной» топологии сети, включая вопросы развития (наращивания) сети, то различные топологии не являются обычно варьируемыми параметрами модели, а задаются пользователем в составе входных данных.

Однако в процессе имитации функционирования СПД КВ должна варьироваться текущая топология сети, связанная с коррелированными отказами и в результате внешних воздействий, описываемых сценариями таких воздействий, и их возможным последующим восстановлением.

Необходимость наличия генератора внешних воздействий на СПД КВ в соответствии с заданным сценарием определяет четвертое принципиальное различие между моделями общедоступных и рассматриваемых сетей.

### 1.6. Список характеристик функционирования сети

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 суммарной интенсивности входной нагрузки. Эти характеристики и зависимости в моделях СПД ОП фиксируются обычно только «в среднем». То есть, не учитываются пользовательские характеристики информационного обмена между конкретными абонентами сети (все абоненты считаются «равноправными») и не рассчитываются времена доведения сообщений «разной содержательности» (сообщения характеризуются только длиной и коррелирующими абонентами).

Так как СПД КВ 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 данной сети существенно шире и дополнительно включает в себя:

- времена доведения специализированных сообщений с разными смысловыми идентификаторами, в том числе, времена доведения между выделенными группами абонентов, а также вероятности доставки сообщений за заданное время;

- характеристики живучести сети, показывающие зависимость вероятностно-временных характеристик доведения в зависимости от параметров моделей внешних воздействий для различных сценариев внешних событий, на которые реагирует АСУ.

Оценивание квантилей времен доведения сообщений необходимо для принятия решений о потенциальных характеристиках проектируемой сети. Так как требования к вероятностям доведения высокоприоритетных сообщений за заданное время обычно являются весьма жесткими, то методы оценивания таких характеристик сводятся к математической задаче проверки статистических гипотез о значении малых вероятностей наступления редких событий. Особенность этой задачи заключается в том, что такое редкое событие как недоведение сообщения за заданное время может просто не наступить за время моделирования (то есть, будет иметь место так называемое «нуль-событие» [22, 23]). Поэтому модель сети должна включать в себя специальные методы обра-

ботки вычислительных экспериментов для проверки гипотез о соответствии сети заданным требованиям. Математические методы планирования и обработки результатов вычислительных экспериментов для проверки гипотез о вероятностях редких событий предложены в работе [24].

Необходимость использования специальных методов планирования и обработки вычислительных экспериментов, проводимых для проверки гипотез о соответствии сети заданным требованиям к вероятностно-временным характеристикам доведения сообщений с разными приоритетами при различных сценариях внешних воздействий, является пятой принципиальной особенностью моделей СПД КВ.

В настоящее время под руководством автора разработан программный комплекс моделирования СПД КВ, учитывающий все вышеприведенные требования. Описание технических решений, на базе которых построен программный комплекс, предполагается опубликовать в следующей статье.

## 2. Интегрированные (смешанные) модели сетей передачи данных

Имитационное моделирование является мощным, но, в то же время, весьма «дорогостоящим» инструментом для проектирования и исследования АСУ и их телекоммуникационных компонентов, так как в процессе имитации в каждом такте моделирования необходимо имитировать большое число сложных взаимосвязанных процессов. Например, при моделировании процессов управления с использованием АСУ, в которых информационный обмен происходит через телекоммуникационную компоненту, необходимо моделировать как процессы в самой АСУ, так и процессы доведения информации, которой обмениваются абоненты АСУ, так как время доведения информации существенным образом влияют на характеристики АСУ в целом. Моделирование процессов передачи информации через сеть в свою очередь связано с моделированием большого числа взаимодействующих в сети процессов – процессов передачи разноприоритетной информации от абонентов (их число может

достигать сотен и тысяч) по трактам передачи данных (их число может достигать тысяч), процессов обработки информации на ЦК (их число может достигать десятков и сотен), и других.

Поэтому возможность использования имитационного моделирования в процессе проектирования, создания и эксплуатации сложных систем достигается, как правило, за счет снижения детальности имитационных моделей и отказа от моделирования части процессов, предположительно слабо влияющих на исследуемые характеристики. Например, не моделируются процессы передачи информации по трактам, или время передачи информации по всей телекоммуникационной компоненте, которые просто заменяются постоянными задержками. Тем самым, снижается точность моделирования и обоснованность выводов, сделанных по результатам имитационных экспериментов с «недетальными» моделями.

Особенно трудоемко имитационное моделирование АСУ КВ и СПД КВ с жесткими требованиями к надежностным и вероятностно-временным характеристикам, так как оно требует существенно более детальной имитации происходящих процессов. В частности, при моделировании СПД КВ дополнительно приходится:

- моделировать не только магистральную сеть, но и абонентов сети, число которых измеряется тысячами;
- моделировать каналы различной физической природы, характеристики которых могут меняться вследствие внешних воздействий на сеть;
- моделировать передачу сообщений различных приоритетов и сложные сценарии генерации потоков сообщений, учитывающих, в том числе, реакцию абонентов на полученные сообщения;
- использовать в модели адаптивные методы маршрутизации и ограничения нагрузки для сообщений разных приоритетов, что влечет необходимость моделирования информационного обмена служебными сообщениями между ЦК о работоспособности трактов передачи данных и их загрузке, а также вычисления маршрутов передачи для каждого сообщения на каждом центре;

- «отслеживать» времена доведения каждого сообщения для оценки вероятностей доставки за заданное время, и др.

Необходимость столь подробной имитации процессов в сети приводит к разработке сложных и ресурсоемких имитационных моделей и неприемлемо высокому замедлению процесса имитации работы сети по отношению к реальному времени, что резко сокращает возможности использования таких моделей в проектировании сложных телекоммуникационных сетей. Замена процессов передачи «константными» имитаторами задержек приводит к низкой адекватности модели, к неприемлемо высоким ошибкам моделирования и, как следствие, к недостоверности выводов и возможности их использования для принятия обоснованных технических решений. Например, для обеспечения надежного информационного взаимодействия в тракты передачи данных СПД КВ входят обычно каналы связи различной физической природы, часть из которых являются аналоговыми и могут иметь характеристики, существенно меняющиеся в зависимости от состояния внешней среды и внешних воздействий, вплоть до полной их деградации. Это приводит к необходимости моделировать отдельные магистральные и абонентские тракты передачи данных и невозможности использовать константные имитаторы задержек.

Так как в любом случае непосредственная имитация процесса передачи сообщения по каждому тракту приводит к неприемлемо высокому замедлению процесса имитации работы сети по отношению к реальному времени, необходима разработка программных имитаторов отдельных процессов, адекватно заменяющие модели этих процессов для различных условий, и включение этих имитаторов в состав имитационных моделей.

Разработка таких «интеллектуальных», не «константных» имитаторов требует, чтобы эти имитаторы обладали целым рядом свойств, обеспечивающих возможность их дальнейшего использования в имитационных моделях.

Проиллюстрируем эти свойства на одном, но достаточно общем примере имитации процесса передачи пакета информации через «телекоммуникационный» элемент, в качестве ко-

торого может выступать канал связи или целая сеть передачи данных. По существу речь идет о том, что если мы в момент времени  $t$  поставили пакет во входную очередь на передачу по выбранному телекоммуникационному элементу, и этот пакет в момент  $(t + \Delta)$  оказался на выходе телекоммуникационного элемента, то программный имитатор должен «предсказать» значение  $\Delta$ , мало отличающееся от того значения, которое было бы получено в результате прямого моделирования процесса ожидания в очереди на передачу и процесса самой передачи. При этом надо иметь в виду следующие обстоятельства:

- задержка  $\Delta$  (ее статистические характеристики при случайном характере задержки) зависят от многих внешних факторов. Например, время стояния в очереди на передачу сообщения определенного приоритета зависит не только от известной в момент постановки длины очереди, но и от неизвестного числа других пакетов более высокого приоритета, которые также будут направлены на передачу в этот телекоммуникационный элемент и которые «обгонят» рассматриваемый пакет, увеличив его задержку. В свою очередь, интенсивность потока таких высокоприоритетных пакетов определяется общей загрузкой сети, поэтому программный имитатор должен включать в себя статистические характеристики различных окружающих процессов, меняющихся во времени, которые позволят прогнозировать случайное время  $\Delta t$  с помощью монтекарловского моделирования;

- однако знание статистических характеристик  $\Delta$  (среднего и дисперсии) недостаточно для прогнозирования. Например, если разygранное в момент  $t$  время передачи  $\Delta(t)$  по аналоговому каналу связи превышало среднее значение, то это означает, что в момент времени  $t$  уровень помех был высоким, и поэтому имитатор должен предсказать задержку  $\Delta(t')$  для пакета, поставленного в близкий момент времени  $t' > t$ , которая также должна превышать среднее значение.

В настоящее время разработан специальный метод создания программных имитаторов процессов передачи, основанный на технологии предсказательного метамоделирования [18-20], использующий результаты проведенных вы-

числительных экспериментов с подробными имитационными моделями и позволяющий предсказывать коррелированные между собой задержки, учитывающие текущие состояния имитируемого коммуникационного элемента и сети в целом. Подробно разработанный способ предполагается описать в следующей работе.

Использование интеллектуальных программных имитаторов позволяет использовать следующую интегрированную (смешанную) технологию моделирования сетей передачи данных.

На низшем уровне сначала подробно, с использованием детальных имитационных моделей, моделируются отдельные тракты и центры коммутации сети. По результатам проведенных имитационных экспериментов оцениваются зависимости характеристик (времен задержек, вероятностей отказов и др.) от параметров состояния моделируемого объекта, характеристик внешних воздействий на него, а также параметров загрузки объекта. Далее по полученным данным строятся метамоделли магистральных и абонентских трактов передачи данных и центров коммутации и интеллектуальные имитаторы задержек, используемые затем в интегрированных моделях более высокого уровня. Заметим, что использование построенной по данным метамоделли принципиально отличается от использования монтекарловской имитации на основе оцененной (построенной по данным) функции распределения. В случае имитации на основе функций распределения сохраняются лишь средние характеристики моделируемого объекта, не дающие адекватного описания процессов в конкретных условиях, в то время как метамоделль позволяет достаточно точно оценить поведение моделируемого объекта в конкретной текущей ситуации.

Интегрированные модели следующего (среднего) уровня имитируют магистральную сеть, но имитационные модели трактов и центров коммутации заменены имитаторами, построенными на низком уровне. По результатам имитационных экспериментов с моделями среднего уровня строится метамоделль магистральной сети и ее имитаторы, которые используются далее в интегрированных моделях телекоммуникационной сети высокого уровня, включающих также метамоделли абонентских трактов.

На следующем (высоком) уровне моделируется сама АСУ, в которой модели телекоммуникационных компонентов (сетей) заменены их имитаторами, построенными на среднем уровне.

Технология интегрированного моделирования включает в себя технологию консолидации данных [25], которая позволяет калибровать метамоделли и имитаторы, построенные на основе результатов вычислительных имитационных экспериментов, по результатам натуральных экспериментов с реальными фрагментами сети, а также ряд взаимосвязанных технологий интеллектуального анализа данных [26-30], связанных с построением «эффективных» аппроксимирующих зависимостей. Однако при моделировании сложных телекоммуникационных сетей входные параметры таких зависимостей могут иметь чрезвычайно высокую размерность, вследствие чего даже высокоэффективные процедуры построения аппроксимирующих зависимостей оказываются неработоспособными. Поэтому важным элементом технологии построения метамоделей является также предварительное снижение размерности входных данных. Применительно к данным, получаемым в результате проведения вычислительных экспериментов с имитационными моделями телекоммуникационной сети, соответствующие методы предложены в работе [31].

## Заключение

Рассмотрены проблемные вопросы моделирования телекоммуникационных сетей с заданными жесткими требованиями к надежности и вероятностно-временным характеристикам. Показаны принципиальные различия между рассматриваемыми сетями и сетями общего пользования, которые не позволяют «эффективно» моделировать такие сети в рамках стандартных технологий имитационного моделирования. Для моделирования телекоммуникационных сетей, характеризующихся высокой внутренней размерностью цифрового описания и сложностью протекающих взаимосвязанных процессов, предложено использовать технологию интегрированного (смешанного) моделирования сложных объектов, основанную на синергии технологий имитационного моделирования, метамоделлирования и интеллектуального анализа данных.

## Литература

1. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных // М. : Мир, 1989. – 544 с.
2. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. Т.2 // М. : Мир, 1975. – 431 с.
3. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов // Под ред. В. С. Семенихина. – М. : Радио и связь, 1986. – 408 с.
4. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М., Мир, 1981, 325 с.
5. Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета // М. : Наука, 1989. – 336 с.
6. Жожикашвили В.А., Вишневецкий В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ // М. : Радио и связь, 1988. – 192 с.
7. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями // –М. : Мир, 1978. – 598 с.
8. Митрофанов Ю.И. Основы теории сетей массового обслуживания : учебн. пособие. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1993. – 116 с.
8. Митрофанов Ю.И., Юдаева Н. В. Методы определения оптимальных параметров управления маршрутизацией в сетях массового обслуживания // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 8. – с. 109–117.
10. Митрофанов Ю.И., Фокина Н.П. Анализ сетей массового обслуживания с динамическим управлением маршрутизацией // Известия Саратов. ун-та. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2007. – Т. 7. – В. 1. – С. 27–33.
11. Уоллэнд Дж. Введение в теорию сетей массового обслуживания // М. : Мир, 1993. – 336 с.
12. Boucherie R.J., Van Dijk N.M. (Editors). Queueing networks: a fundamental approach / New York, Heidelberg, London : Springer Science + Business Media, LLC, 2011. – 823 p.
13. Dattatreya G.R. Performance Analysis of Queuing and Computer Networks / CRC Press/Taylor & Francis, Chapman & Hall/CRC computer and information science series. CRC Press/Taylor & Francis, 2008. – 449 p.
14. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем, искусство и наука // М. : Мир, 1978. – 420 с.
15. 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) Том II. – С. 11–16.
16. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World : учебн. пособие. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.
17. Гудов А.М., Семехина М.В. Имитационное моделирование процессов передачи трафика в вычислительных сетях // Управление большими системами. – 2010. в. 31. – С. 130–161.
18. Кулешов А.П. Метамоделли в компьютерных системах проектирования. Труды Международной научно-технической конференции «Информационные техно-

- логии 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.
19. Кулешов А.П. Технология быстрого вычисления характеристик сложных технических объектов. Информационные технологии, 2006, Вып. 3, с. 4 - 11.
  20. Кулешов А.П. Интеграция данных и знаний при построении метамоделей. Труды Третьей международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2009, 14-18 сентября 2009 г., Звенигород, Россия). 2009, с. 20 – 29.
  21. Григелионис Б. И. Предельные теоремы для сумм процессов восстановления. Сб. «Кибернетика – на службу коммунизму», т. 2, Изд-во «Энергия», М.-Л., 1964, с. 246 – 265.
  22. Гуров С.И. Оценка вероятности ни разу не наблюдаемого события // Таврический вестник информатики и математики. – 2009. – в. 2. – С. 15–20.
  23. Гуров С.И. Оценка вероятности 0-события // Вестник Тверского гос университета, серия Прикладная математика. – 2009. – в. 14. – С. 55–66.
  24. Агалаков Ю.Г. Оценивание вероятностей редких событий в вычислительных экспериментах с имитационными моделями // Управление большими системами. Выпуск 40. М.: ИПУ РАН, 2012. с. 83 - 95.
  25. Бурнаев Е.В., Бернштейн А.В. Методы консолидации разноточных данных. Труды 8-й международной конференции «Интеллектуализация обработки информации» (ИОИ-2010), 17- 24 октября 2010, Кипр. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 220-223.
  26. 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.
  27. Кулешов А.П., Бернштейн А.В. Предсказательное мета моделирование и интеллектуальный анализ данных. Двенадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2010). Труды конференции. - Т. 1. - М.: Физматлит, 2010. - с. 192 - 200.
  28. Бернштейн А.В., Бурнаев Е.В., Кулешов А.П. Интеллектуальный анализ данных в мета моделировании. Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных. Материалы XVII Всероссийского семинара (2 – 4 октября 2009 г.), Красноярск, ИПК СФУ, 2009, с. 23 – 28.
  29. Bernstein A.V., Kuleshov A.P. Computer Data Analysis in Metamodeling. Proceedings of the 9th International Conference on Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems (CDAM'2010), September, 7-11, 2010, Minsk, Belarus, 2010.
  30. Kuleshov A.P., Bernstein A.V. Predictive Modeling and Data Analysis. Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Information Processing (IIP-2010), October, 17-24, 2010, Republic of Cyprus, Paphos, M.: МАКС Пресс, pp. 212 – 215.
  31. Агалаков Ю.Г., А.В. Бернштейн А.В. Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012, № 3, с. 3 – 17.

**Агалаков Юрий Глебович.** Заместитель Генерального директора ОАО МКБ «Компас». Окончил ЛГУ в 1986 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 30 печатных работ. Область научных интересов: информационные и телекоммуникационные технологии, моделирование. E-mail: ksu\_leo@rambler.ru