

## ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НЕОБХОДИМЫЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### DISTINCTIVE FEATURES ARE NECESSARY IN THE MODELING OF COMMUNICATION NETWORKS OF SPECIAL PURPOSE

**M. Pylinsky  
A. Myakotin  
S. Kryvtsov  
G. Baiseitov**

*Summary.* the purpose of this article is to analyze the features of the construction and operation of special-purpose communication networks and identify those features that are not used in the modeling of standard modeling technologies of public telecommunication networks and that must be taken into account when building adequate predictive models of systems (networks) and simulators based on them.

*Keywords:* network communication special purpose communications network for General use, the model communication network.

**Пылинский Максим Валерьевич**

*К.воен.н., ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого» (г. Санкт Петербург)*  
pylinskii.maksim@mail.ru

**Мякотин Александр Викторович**

*Д.т.н., профессор, ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого» (г. Санкт Петербург)*  
aleksandrmyakotin@gmail.com

**Кривцов Станислав Петрович**

*Старший преподаватель, ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого» (г. Санкт Петербург)*  
staskriv@mail.ru

**Байсаитов Гани Нуралиевич**

*К.т.н., ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого» (г. Санкт Петербург)*  
bayyseitov.ganinurgalievich@rambler.ru

*Аннотация.* целью данной статьи является анализ особенностей построения и функционирования сетей связи специального назначения и выявление тех особенностей, которые не используются при моделировании в рамках стандартных технологий моделирования сетей электросвязи общего пользования и которые нужно непременно учитывать при построении адекватных предсказательных моделей систем (сетей) и имитаторов на их основе.

*Ключевые слова:* сеть связи специального назначения, сеть связи общего пользования, модель сети связи.

**В** процессе развития и совершенствования сетей связи специального назначения (СС СН) необходимо принимать различные организационные и технические решения относительно состава и структуры, выработки способов и алгоритмов функционирования, включая выбор различных показателей и критериев оценки наиболее важных и существенных свойств с целью отыскания эффективных способов ее построения. С учетом сложности, динамичности масштабности СС СН, обоснование решений по ее построению осуществляется, как правило, с применением различных методов моделирования, что позволяет исследовать линию поведения и разных вариантов построения в предсказуемых условиях функционирования с учетом факторов вооруженного противоборства. Особенно важной и сложной задачей при моделировании СС СН является исследование характеристик структуры и поведения, поскольку в целом в значительной мере именно они определя-

ют эффективность функционирования данного рода систем.

Подойдем к вопросу системно и логически. Определимся сначала, что есть СС СН. Из всех доступных источников, а также из нормативно-правовых документов определение понятия «сеть связи специального назначения» наиболее четкое, раскрывающее суть явления, представлено в Законе о связи [1]. СС СН является сетью электросвязи, предназначенной для обеспечения нужд государственного управления, национальной безопасности, обороны, охраны правопорядка, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и является составным элементом единой сети электросвязи (ЕСЭ) [1].

Согласно [1] ЕСЭ — совокупность сетей электросвязи общего пользования, выделенных, технологических и специального назначения, обеспечивающая связь

между абонентами внутри страны и выход на международную сеть.

В свою очередь, сеть электросвязи общего пользования (СЭОП) — это комплекс взаимодействующих сетей электросвязи, предназначенный для оказания услуг электросвязи всем пользователям услуг электросвязи, в том числе по распространению программ телевизионного вещания и радиовещания [1].

Выбор метода исследования, как правило, неразрывно связан с выбором или разработкой соответствующей модели. Для проведения исследования систем и сетей связи специального назначения в настоящее время используются различные их модели [2]. Модель — представление объекта, системы или понятия (идеи) в некоторой форме, отличной от формы их реального существования; средство, помогающее в объяснении, понимании или совершенствовании системы; используемый для предсказания и сравнения; инструмент, позволяющий логическим путем спрогнозировать последствия альтернативных действий и достаточно уверенно указать, какому из них отдать предпочтение [3].

Общими требованиями к моделям являются:

1. адекватность — достаточно точное отображение свойств объекта;
2. полнота — предоставление получателю всей необходимой информации об объекте и его поведении в различных условиях обстановки;
3. гибкость — возможность воспроизведения различных ситуаций во всем диапазоне изменения условий и параметров;
4. трудоемкость разработки должна быть приемлемой для имеющегося времени и программных средств [3].

Основное требование к модели — отражение существенных (основных, рассматриваемых) свойств структуры системы и воспроизведение процессов ее функционирования (адекватность). Адекватность означает, достаточно ли для целей исследования модель отображает систему и ее поведение. Между моделью и оригиналом должно быть подобие (физическое, геометрическое, структурное, функциональное и пр.). Степень подобия может быть различной — от тождества в отдельных аспектах до сходства только в главном. Кроме других названных требований к моделям предъявляются требования по соответствию числа параметров с системой, наличию параметров оптимизации и достаточной оперативности [3]. Модель должна учитывать вновь появившиеся факторы, влияющие на функционирование СС СН. Разработка адекватной модели — одно из важнейших условий корректности проведения исследования.

В силу сложности и многоаспектности СС СН, некоторые аналитические методы не позволяют решать даже хорошо формализованные частные задачи математического моделирования. Использование для этих целей известных математических моделей (потокосовые модели на графах, сети массового обслуживания и т.п. [4–7]) позволяют, в лучшем случае, получить лишь качественные выводы о протекающих в сети процессах. В настоящее время наиболее эффективно применение имитационного моделирования. *Имитационная модель* представляет собой алгоритмическое описание процесса функционирования системы на основе установленных статистических, аналитических и логических зависимостей, предназначенное для исследования реальных объектов путем численного эксперимента [2, 3].

Существуют развитые и апробированные технологии имитационного моделирования сетей связи [2]. Безусловно, в силу своего исходного назначения, многие процессы, протекающие в СС СН, подобны процессам, происходящим в СЭОП, и могут моделироваться использованием стандартных технологий моделирования. Однако СС СН с заданными жесткими требованиями по своевременности, достоверности и безопасности доставки сообщений (информации) имеют ряд существенных особенностей по сравнению с СЭОП, которые необходимо учитывать при моделировании и которые не позволяют использовать стандартные модели и пакеты моделирования сетей.

При разработке (проектировании) и исследовании СС СН приходится иметь дело не с одной моделью, а с системой моделей, так как на каждом этапе создания (исследования, синтеза) системы связи используются свои модели, отвечающие поставленным целям и задачам. Так на этапе (стадии) макропроектирования требуется обобщенная модель (макромодель), отражающая систему связи в целом. На стадии микропроектирования необходимы модели различных подсистем и элементов системы связи.

Создание многоуровневой комплексной и динамичной модели системы связи, включающей множество моделей, объединенных единством цели, исходных данных и общей идеологией решения задач ее построения и функционирования является одной из проблем теории и практики построения систем связи. Уровни моделей определяются как иерархичностью построения системы связи, так и требуемой степенью детализации разработки ее элементов. Верхним уровнем такой модели должна быть макромодель системы связи, представляющая систему связи в целом как составную часть надсистемы — системы управления войсками. Промежуточными уровнями должны стать модели составных частей системы связи (подсистем, сетей, узлов, линий и т.д.).

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

- ◆ структуру моделируемой системы связи;
- ◆ структуру информационных потоков, циркулирующих в системе связи;
- ◆ базовые алгоритмы и протоколы, реализованные в системе связи и отражаемые в модели;
- ◆ перечень варьируемых параметров в модели системы связи.

В отличие от СЭОП, в СС СН часть абонентов, узлов связи пунктов управления (УС ПУ) зачастую подключаются одновременно к нескольким опорным (вспомогательным) УС, коммутационным центрам (КЦ) опорной (транспортной) сети связи, что связано с необходимостью обеспечения своевременной доставки сообщений через созданные, образованные сети за заданное время, с целью обеспечения требуемой устойчивости всей системы связи. Такой характер подключения абонентов (УС ПУ) определяет ряд важных особенностей, которые необходимо отражать в моделях. Прежде всего, алгоритмы маршрутизации пакетов (сообщений) на опорных (вспомогательных) УС опорной (транспортной) сети должны учитывать «многопривязанность» абонентов (УС ПУ). Поэтому, моделирование такой системы не может сводиться к моделированию только опорной (транспортной) сети связи, и модель должна описывать сеть графом, в который входят не только опорные (вспомогательные) УС (КЦ), но и сами абоненты (УС ПУ). При этом необходимо учитывать различный характер вершин графа, т.е. через абонентов (УС ПУ) не может осуществляться передача (коммутация) пакетов (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 линии (каналы) связи, используя либо имитационные модели для различных линий (каналов) связи, либо метамоделей [2, 6], построенные по результатам предварительно проведенных вычислительных экспериментов с имитационными моделями. Эти факты отражают одно из принципиальных различий между моделированием общедоступных СЭОП и рассматриваемых СС СН.

В СС СН циркулирует информация разного типа, имеющая разные приоритеты и к доставке которой предъявляются различные требования по своевременности. Тем

самым, при моделировании СС СН необходимо иметь совокупность моделей, описывающих входные потоки информации, имеющей разные приоритеты.

Информация, циркулирующая в СУВ, разделяется по важности и категориям срочности. Должностные лица системы управления, использующие СС СН как для обмена «повседневной» служебной информацией, так и для передачи критически важной информации (сигналов боевого управления и оповещения), определяемой функционированием СУВ в соответствии с ее задачами, для которой потоки с неспецифической информацией имеют характер фоновых потоков.

Характер низкоприоритетных потоков близок к характеру информационных потоков в СЭОП, поэтому такие потоки могут описываться пуассоновскими моделями с переменной интенсивностью. Однако высокоприоритетные информационные потоки с критически важной информацией определяются сценариями развития ситуации в СУВ и не могут описываться простыми математическими моделями.

Как правило, сценарий изменения оперативной обстановки в СУВ определяет последовательность внешних факторов (действий противоборствующей стороны), на которые «реагирует» СУВ (дальнейшие события могут определяться также действиями, предпринимаемыми в результате реагирования СУВ). Каждое произошедшее событие порождает конкретный поток сообщений, отправляемый от одних конкретных должностных лиц (органов управления) к другим. При получении каждого сообщения, каждое должностное лицо СУВ в соответствии со своим сценарием реагирования на полученные сообщения порождает свой поток сообщений в адрес других конкретных должностных лиц СУВ. Сценарии реагирования органов управления могут носить стохастический характер и имитироваться с помощью моделей, внешних по отношению к моделям СС СН.

Подобный характер информационных потоков, циркулирующих в СС СН, в виде суперпозиции низкоприоритетных потоков, описываемых пуассоновскими моделями, и высокоприоритетных информационных потоков, определяемых содержательными сценариями функционирования СУВ и реализуемых в виде внешних сценарных моделей, является вторым принципиальным различием между существующими моделями СЭОП и моделированием рассматриваемых СС СН.

В СЭОП обычно отсутствуют жесткие требования к временам доведения сообщений. На каждом УС (КЦ) имеются так называемые «матрицы маршрутизации», указывающие в какой магистральный тракт направить пакет (сообщение) в заданный оконечный УС (КЦ). Ма-

трицы маршрутизации основаны на модели опорной (транспортной) сети связи в виде ориентированного графа и рассчитываются централизованно, с использованием математических моделей потоков в сетях и соответствующих графовых алгоритмов оптимизации [5, 7]. При изменении топологии сети связи (появлении новых УС (КЦ) или линий связи) матрицы маршрутизации пересчитываются централизованно.

В отличие от СЭОП, «многопривязанность» абонентов (УС ПУ) в СС СН требует моделирования доставки сообщения не только до одного из оконечных УС (КЦ), к которому привязан абонент-получатель, но и моделирование передачи по соответствующему абонентскому тракту. Это накладывает следующие требования к моделям СС СН: маршрутизация должна учитывать «многопривязанность» абонентов, и матрицы маршрутизации для доведения информации до УС ПУ не определяют полностью маршруты дальнейшей передачи.

Потоки информации в СУВ разделяются по важности и категориям срочности, как и направления связи различаются по группам важности, к которым предъявляются разные требования к их вероятностно-временным характеристикам. Поэтому информационные потоки между органами управления имеют разный приоритетный характер, определяющий приоритетность их обслуживания в элементах сети. Соответственно, СС СН, 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 СЭОП и СС СН, которые обязательно должны отражаться в моделях, являются механизмы реагирования на неравномерную загрузку элементов СС СН (ОУС, ВУС и КЦ), которая может быстро и существенно изменяться с течением времени, и на процессы кратковременных отказов и восстановлений этих элементов.

Так как в СЭОП 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 УС или линий связи их соединяющих в СЭОП обычно не используются адаптационные механизмы, оперативно реагирующие на изменение топологии сети. Ввиду того, что 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 своевременности доставки сообщений, алгоритмы маршрутизации (коммутации) в СС СН должны «мгновенно» реагировать как на изменение своей структуры, связанной с отказами и восстановлениями элементов, так и на меняющуюся загрузку этих элементов, и оперативно перестраивать свою маршрутизацию (коммутацию). Это особенно важно, так как, в отличие от СЭОП, в которых отказы элементов сетей связаны, как правило, с техническими причинами, в СС СН отказы могут носить коррелированный характер в результате внешних воздействий и в первую очередь связанных со стремлением противоборствующей стороны повлиять на функционирование СУВ и ее технической основы системы связи. В случае «централизованной» маршрутизации (коммутации) существенно снижается степень адаптации маршрутизации (коммутации) к реальной обстановке на сети, а при отказе гипотетического центра управления сетью, на котором происходит централизованный пересчет маршрутов (каналов, трактов), сеть просто не будет реагировать на состояние, что может привести к большой задержке доведения или к недоведению даже критически важной высокоприоритетной информации.

Соответственно, преобразование маршрутов доведения информации в СС СН должно носить децентрализованный (адаптивный) характер и выполняться на каждом УС (КЦ) автономно. Для выбора оптимальных маршрутов на каждом УС необходима информация о текущем состоянии сети (ее топологии и загрузке ее элементов). Эта информация на конкретном УС включает в себя не только информацию об отказавших линиях (трактах) связи и об отказах КЦ, подключенных к УС (такая информация на КЦ естественно есть), но и информацию об отказах других линий (трактов) связи и КЦ. Тем самым, в СС СН должны присутствовать механизмы обмена внутренней (служебной) информацией между УС (КЦ), содержащей сведения об отказах и восстановлениях СС СН, 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 СУВ, механизмы формирования и доведения служебной информации должны найти отражение в моделях СС СН.

Вышесказанное определяет следующие требования к моделям СС СН:

- ♦ маршрутизация в модели должна учитывать «многопривязанность» абонентов, и матрицы

маршрутизации для доведения информации до УС не определяют полностью маршруты дальнейшей передачи;

- ◆ модель должна обеспечивать приоритетную обработку сообщений в элементах сети;
- ◆ модель должна имитировать процесс обмена служебной информацией между УС, содержащей сведения о текущем состоянии (отказах и восстановлении линий (трактов)связи и загрузке функционирующих линий (трактов)связи);
- ◆ методы маршрутизации, реализуемые в модели, должны быть адаптивными и децентрализованными. В моделях должны реализовываться различные алгоритмы маршрутизации для пакетов и сообщений с разными приоритетами, находить различные маршруты передачи разноранжированных сообщений даже в адрес одного абонента-получателя и моделировать очереди на передачу сообщений с разными приоритетами. Наличие в одном информационном направлении линий 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 УС ПУ временно ограничивают потоки входных сообщений определенной приоритетности от абонентов-отправителей. Эти требования к модели определяют третье принципиальное различие между моделями СЭОП и СС СН.

Как правило, при проведении вычислительных экспериментов с моделями СЭОП, 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 СС СН 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 СС СН в соответствии с заданным сценарием определяет четвертое принципиальное различие между моделями СЭОП и СС СН.

Анализ современных СС СН, а также перспектив их развития, выявил следующие основные тенденции по технологическому их построению. В первую очередь, это отказ от построения СС СН на основе отдельной связной инфраструктуры и переход к построению СС СН на основе гибридного подхода, когда отдельные сегменты СЭОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН. Во вторую очередь, это максимальное широкое использование для построения СС СН подходов, протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций. При недостатке собственных ресурсов в СС СН, как правило, необходимые каналные ресурсы, в данном случае используются ресурсы СЭОП, т.е. арендуются у региональных и национальных операторов связи.

Необходимо отметить, что используемые структурно-технологические решения по сопряжению транспортных сетей из состава СС СН с сетями в составе СЭОП обеспечивают связность на сетевом уровне, как правило, за счет использования единых протокольных решений. В целях обеспечения безопасности при сопряжении СС СН с СЭОП должны быть использованы решения, обеспечивающие изоляцию адресных пространств отдельных сетей в составе СС СН и передаваемых потоков трафика от тех сегментов и потоков, которые обслуживаются в СЭОП.

Соответственно, для СС СН характерен переход к гибриднему построению, когда отдельные сегменты СЭОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН. Кроме того, наблюдается устойчивая тенденция отказа от использования в СС СН закрытых и специализированных протоколов связи и максимально широкое использование в СС СН протоколов и технологий связи и телекоммуникаций двойного назначения. Данные факты определяют пятое ключевое отличие СС СН от СЭОП, необходимые при разработке соответствующей модели.

Таким образом, рассмотрены проблемные вопросы моделирования СС СН с заданными жесткими требованиями к 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. Современным СС СН свойственен переход к децентрализованной сетевой структуре, которая в большей степени соответствует современным требованиям к системам государственного и военного управления. Отказ от построения СС СН на основе отдельной связной инфраструктуры

и переход к построению СС СН на основе интегрального подхода, когда отдельные сегменты СЭОП, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН. Для моделирования СС СН, характеризующихся высокой внутренней размерностью математического описания и сложностью

протекающих взаимосвязанных процессов, предложено использовать технологию интегрированного (смешанного) моделирования сложных объектов, основанную на синергии технологий имитационного моделирования, математического моделирования и интеллектуального анализа данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исаков Е.Е., Мякотин А.В., Губская О.А., Кривцов С.П. Оптимальная цифровизация военных систем связи. Современная наука. Актуальные проблемы теории и практики. Серия естественные и технические науки № 3–4. 2017. С. 22–26 Математическое моделирование систем связи: учебное пособие / Васильев К.К., Служивый М.Н. — Ульяновск: УлГТУ, 2010. — 170 с.
2. Исаков Е.Е., Мякотин А.В., Жадан А.П., Кривцов С.П., Басулин Д.В. Оценка необходимых и достаточных значений реальной пропускной способности военных систем передачи информации. Информация и космос. Радиотехника и связь. СПб. 2017. С. 133–136.
3. Боев В.Д. Моделирование проектирование систем / В.Д. Боев, Ю.В. Кондрашев. / Учебник. — СПб.: ВАС, 2016. — 246с.
4. Гудов А.М. Имитационное моделирование процессов передачи трафика в вычислительных сетях / А.М. Гудов, М.В. Семехина // Управление большими системами. — 2010. — С. 130–161.
5. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие / Васильев К.К., Служивый М.Н. — Ульяновск: УлГТУ, 2010. — 170 с.
6. Макаренко С.И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113–164.
7. Мошак Н.Н. Методология моделирования и анализа процессов функционирования пакетных мультисервисных сетей // Н.Н. Мошак, А.И. Яшин, Е.В. Давыдова / Электросвязь, № 4, 2015. — С35–39.

© Пылинский Максим Валерьевич (pylinskii.maksim@mail.ru), Мякотин Александр Викторович (aleksandrmyakotin@gmail.com), Кривцов Станислав Петрович (staskriv@mail.ru), Байсаитов Гани Нуралиевич (bayuseitov.ganinurgalievich@rambler.ru).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Будённого