



УДК 004.7

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВИРТУАЛЬНОГО КАНАЛА

Т.М. Татарникова^a, М.А. Елизаров^b

^a Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: tm-tatarn@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 17.09.16, принята к печати 29.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Татарникова Т.М., Елизаров М.А. Имитационная модель виртуального канала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1120–1127. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127

Аннотация

Предмет исследования. Предложен вычислительный инструмент для оценки вероятностно-временных характеристик инфокоммуникационной сети как показателей качества при выборе эффективных проектных решений. Для оценки вероятностно-временных характеристик инфокоммуникационных сетей применено имитационное моделирование, позволяющее учесть динамические и стохастические аспекты их функционирования. Предложен подход к снижению размерности имитационной модели, основанный на декомпозиции инфокоммуникационной сети на множества виртуальных каналов. **Используемые подходы.** Топологически полная инфокоммуникационная сеть представляется моделью виртуального канала, соединяющего источник и адресат, а вероятностный эквивалент нерассматриваемой части сети представлен в виде генератора внешних потоков, чтобы учесть особенности взаимодействия потока рассматриваемого виртуального канала с потоками других маршрутов. Одна и та же модель виртуального канала для представления разных сегментов инфокоммуникационной сети будет отличаться только параметрами. **Основные результаты.** Показано, что применение объектного подхода позволяет строить вариации структур и параметров виртуального канала, соответствующие реальным сегментам инфокоммуникационной сети. Продемонстрирована сходимость результатов аналитического и имитационного моделирования, что позволяет применять имитационную модель виртуального канала как вычислительный инструмент для оценки вероятностно-временных характеристик инфокоммуникационной сети. **Практическая значимость.** Модель виртуального канала может быть полезна как средство для планирования вычислительных ресурсов и прогнозирования показателей качества инфокоммуникационной сети.

Ключевые слова

виртуальный канал, имитационная модель виртуального канала, снижение размерности модели, декомпозиция инфокоммуникационной сети, вероятностно-временные характеристики инфокоммуникационной сети

VIRTUAL CHANNEL SIMULATION MODEL

Т.М. Tatarnikova^a, М.А. Elizarov^b

^a Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: tm-tatarn@yandex.ru

Article info

Received 17.09.16, accepted 29.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127

Article in Russian

For citation: Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. Virtual channel simulation model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1120–1127. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127

Abstract

Subject of Research. We propose a computational tool to evaluate the probability-time characteristics of info-communication network as the quality indicators in the selection of effective design solutions. For the assessment of probability-time characteristics of info-communications networks we use simulation that makes provision for the dynamic and stochastic aspects of their functioning. We recommend an approach to reduce simulation model dimensionality based on the decomposition of info-communication network into sets of virtual channels. **Methods.** Topologically complete info-

communication network is a virtual channel model that connects the source and destination, and the probability equivalent of not considered network part is represented as a generator of external flows for taking into account the interaction peculiarities of considered virtual channel flow with flows of other routes. One and the same virtual channel model for representation of different segments of info-communication network differs only in parameters. **Main Results.** It is shown that the object approach application gives the possibility to build structures and variations of the virtual channel parameters corresponding to real segments of info-communication network. Convergence of the analytical modeling results and simulation is demonstrated. Thus, the use of the virtual channel simulation model as a computational tool is possible to evaluate the probability-time characteristics of the info-communications network. **Practical Relevance.** Virtual channel model can be useful as a tool for planning and forecasting of computing resources indicators of the info-communication network quality.

Keywords

virtual channel, virtual channel simulation model, model dimension reducing, info-communication network decomposition, info-communication network probability-time characteristics

Введение

Виртуальный канал (ВК) представляет собой коммутационный канал, обеспечивающий транспортировку информационных пакетов между двумя удаленными узлами инфокоммуникационной сети (ИКС), т.е. некоторый маршрут, состоящий из последовательности узлов коммутации (УК) и каналов связи (КС), по которому осуществляется передача информации из узла источника в узел-адресат [1, 2].

Сообщения источника ВК (рис. 1) назовем выделенным потоком (ВП) с интенсивностью поступления λ^B пакетов в секунду (пак/с). Когда сообщения ВП проходят от узла к узлу вдоль линии следования, то встречаются с внешними сообщениями, с которыми разделяют ВК. Внешние сообщения поступают в узел, принадлежащий ВК, из других узлов ИКС, не входящих в рассматриваемый ВК, или поступают впервые из некоторого внешнего источника. Этот поток назовем транзитным с параметром λ^T . Транзитные потоки (ТП) вносят задержки в процесс доставки пакетов выделенного потока, занимая ресурсы ВК. Таким образом, можно построить вероятностный эквивалент нерассматриваемой части ИКС в виде генератора транзитных потоков, для того чтобы учесть особенности взаимодействия ВП с потоками других маршрутов. Одна и та же модель ВК для представления разных кластеров ИКС будет отличаться только параметрами [3, 4].

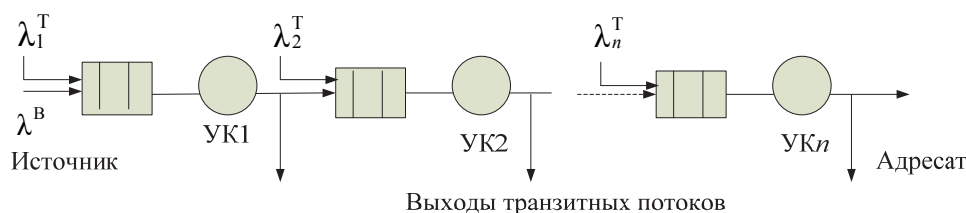


Рис. 1. Концептуальная модель виртуального канала

Реализация такого подхода дает выигрыш в том смысле, что ИКС как объект моделирования будет иметь существенно меньшую размерность. Топологически полная ИКС содержит N узлов. Отдельный маршрут, представленный моделью ВК, содержит $\log N$ коммутационных узлов [5]. Таким образом, относительное сокращение числа узлов в модели ВК по отношению к полной ИКС составляет $N/\log_2 N$.

Особенности реализации имитационной модели виртуального канала

Основной задачей, возлагаемой на модель ВК, является оценка времени доставки пакетов по исследуемому пути при заданных характеристиках элементов пути, параметрах входящих потоков, алгоритмах обработки и дисциплинах обслуживания очередей [6, 7]. Не менее важно определить вероятность потери пакетов, вероятность своевременной доставки пакетов, распределение времени доставки пакетов; ширину изменения времени доставки пакетов; минимум/максимум от времени доставки пакетов [8]. Знание этих характеристик существенно как для оценки характеристик сети в целом, так и для развития и расширения ИКС [9]. Компоненты моделирующей программы ВК и связь между ними приведены на рис. 2.

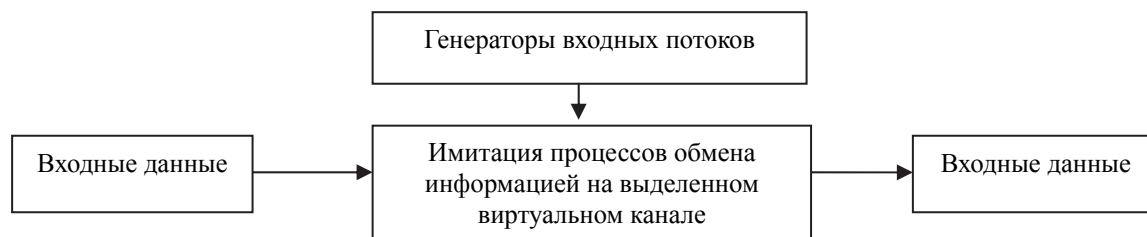


Рис. 2. Компоненты виртуального канала

Множество *входных данных* состоит из четырех групп задаваемых параметров, классифицированных по назначению и описывающих:

1. структуру ВК – число УК и КС, ограничения очередей в УК/КС [10, 11];
2. характеристики УК и КС – пропускная способность каждого УК и КС, функция распределения времени обработки пакета на УК и КС, приоритеты обслуживания на УК и КС [12, 13];
3. поступающую нагрузку – интенсивность поступления пакетов на УК и КС, функция распределения времени поступления пакетов на УК и КС, длина пакета, маршрутная таблица [10, 14].
4. эксперимент – количество экспериментов, задаваемое как число сгенерированных пакетов ВП.

Множество *выходных данных* состоит из двух групп, классифицированных по характеристикам, оценивающим:

1. время доставки пакета по ВК – среднее время доставки пакета (задержка), дисперсия задержки, гистограмма-функция распределения задержки;
2. очереди в УК и КС – средняя длина очереди, максимальное значение очереди, количество потерянных пакетов.

Генераторы входных потоков ограничены тремя типами: пуассоновским, Эрланга, детерминированным. Интенсивности потоков ИКС задаются в виде матрицы тяготений $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$, $i, j = \overline{1, N}$, в которой заданы интенсивности потоков, поступающих в сеть. Нумерация потоков упорядочена согласно возрастанию номеров узлов-источников. Общее количество потоков при наличии обмена информацией каждого УК с каждым равняется $N(N-1)$.

Поток рассматриваемого ВК (УК₁, УК_{*n*}) задается значением средней интенсивности потока λ^B пак/с и функцией распределения вероятностей времени поступления пакетов.

Транзитные потоки задаются значениями средней интенсивности λ_i^T , $i = \overline{1, n}$ пак/с и маршрутной матрицей. Интенсивности для каждого из n транзитных потоков формируются поочередно согласно (1):

$$\lambda = \sum_{v=1}^m \lambda_v, \quad (1)$$

где λ_v – интенсивность потоков из смежных узлов; m – число смежных узлов.

Маршрутная матрица задана размерностью $N(N-1)(D+1)$, в которой число строк равно числу потоков, число столбцов – числу узлов в максимальном по длине маршруте. В каждой строке матрицы записаны номера узлов, составляющих основной маршрут потока, номер которого соответствует номеру строки. Для потоков, маршрут которых состоит из числа узлов менее $(D+1)$, свободные столбцы заполнены нулями. Узлы, записанные в первый столбец матрицы маршрутизации, назовем узлами, входящими в маршрут на первом уровне, узлы второго столбца – соответственно узлами 2-го уровня и т.д.

Если ВК состоит из последовательности n узлов ($n-1$ транзитов), то для i -го УК, $i = \overline{1, n}$ нужно определить интенсивности $(n-i+1)$ потоков: потока, проходящего через i -й узел и поступающего дополнительно к выделенному потоку. Поток, поступающий на узел i , покидает маршрут после j -го узла с вероятностью

$$P_j^{(i)} = \lambda_j^{(i)} / \lambda^{(i)}. \quad (2)$$

Расчеты значения интенсивностей ТП, проходящих через узел i рассматриваемого ВК, и вероятности их ухода выполняются по следующей схеме (алгоритму).

1. Формируется вектор суммарных интенсивностей потоков, поступающих на узел i и покидающих узел j , $j = \overline{0, n}$; идентификатором $j=0$ обозначается поток, получаемый по (1), идентификатором $j>0$ обозначаются суммарные потоки, поступающие на i -й и покидающие узел j .
2. Просматривается строка матрицы маршрутизации потоков.
3. Если узел i входит в маршрут потока, то необходимо проверить, является ли узел продолжением рассматриваемой строки матрицы маршрутизации потоков. Если да, то снова возвращаемся к п. 2, в противном случае переходим к п. 4.
4. Если узел i не входит в маршрут потока, соответствующего рассматриваемой строке, переходим к п. 7.
5. В зависимости от того, какое звено заданного пути входит в рассматриваемый маршрут (звено i , либо звено $i, i+1$, либо звено $i, i+1, \dots, n$), формируется интенсивность ТП, проходящего через это звено.
6. Если узел i входит в рассматриваемый маршрут на j -м уровне, то интенсивность потока, соответствующего рассматриваемой строке матрицы маршрутизации потоков, суммируется с интенсивностью ТП, на которую указывает идентификатор «0», а также с интенсивностью, на которую указывает идентификатор j .
7. Переходим к следующей строке матрицы маршрутизации потоков и повторяем действия, начиная с п. 2.

Таким образом, имея матрицу трафика сети и таблицу маршрутизации пакетов, можно по (1) и приведенной схеме однозначно определить интенсивность входящего потока для каждого узла i , $i = \overline{1, n}$, заданного ВК и их вероятности ухода из ВК, определяемые по (2).

Распределение моментов поступления ТП неизвестно, обычно на основе предельных теорем его принимают пуассоновским [15]. Учитывая, что процесс транспортировки сообщений по сети управляется линейными и сквозными протоколами, можно полагать, что межузловым потокам присуща определенная регулярность. Необходимую степень регулярности можно отразить, задавая моменты поступления пакетов распределением Эрланга. Порядок Эрланга K для генерируемых ТП можно варьировать в широком диапазоне. Значение $K=\infty$ соответствует регулярным ТП со случайно сдвинутыми моментами поступления пакетов от разных УК.

Имитацию процессов обмена информацией на выделенном ВК рассмотрим на уровне описания объектов модели и самой моделирующей программы.

Объектами, составляющими имитационную модель ВК, являются:

- пакет;
- очереди;
- узел коммутации;
- канал связи.

Пакет в программной модели ВК представлен структурой, состоящей из следующих полей:

- Start – поле для фиксирования момента времени поступления пакета в ВК – момент генерации пакета;
- Time – поле для фиксирования момента времени наступления очередного события;
- AD – поле для записи адреса получателя информационного пакета, т.е. номер узла ВК, после обработки в котором пакет покидает моделируемый ВК;
- IST – поле для записи адреса источника/отправителя;
- Status – поле, в котором фиксируется статус пакета: true, когда пакет может обрабатываться или передаваться, иначе false, т.е. пакет находится в очереди (ожидает обслуживания).

Формат пакета в модели сделан одинаковым для пакетов всех потоков.

Очередь пакетов представлена в виде связного списка (рис. 3). Каждый элемент списка – это пакет и ссылка на следующий элемент, т.е. адрес следующего пакета в очереди. Применение связных списков для имитации очереди связано с тем, что при удалении, включении или перестановке элемента достаточно изменить ссылки, основная же информация остается на месте без изменения.

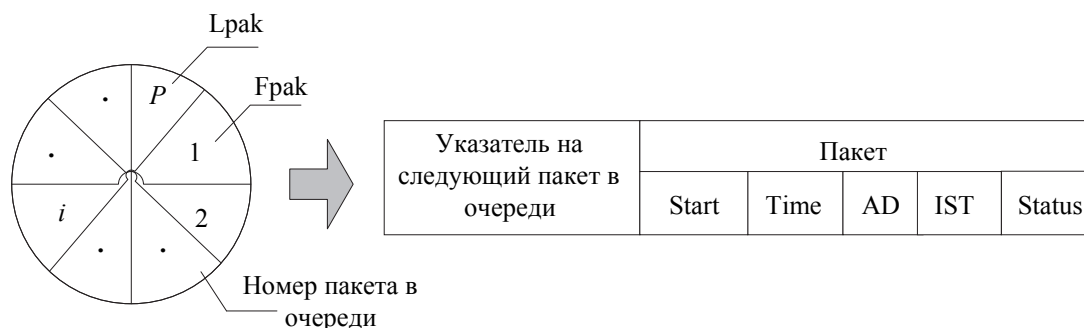


Рис. 3. Представление очереди в виде связного списка

Буферные накопители в модели ВК размещаются как перед УК, так и перед КС. Если при поступлении пакетов в УК или КС последний оказывается занятым, поступившие пакеты ставятся в очередь во входном буфере. Пакеты ТП после обработки на узле ВК, если их адрес соответствует данному узлу, покидают выделенный путь и больше не оказывают влияния на остальные пакеты.

УК и КС представляют собой идентичные структуры со следующими полями:

- Пакет – структура, в которой зафиксированы данные о пакете, который находится на обслуживании в УК (КС);
- Lpak – указатель на последний пакет в очереди к УК (КС);
- Fpak – указатель на первый пакет в очереди к УК (КС);
- Count – счетчик пакетов в очереди к УК (КС).

В имитационной модели ВК предусмотрено три варианта дисциплины обслуживания заявок в УК и КС.

- FIFO – First In, First Out – первым пришел – первым ушел.
- LIFO – Last In, First Out – последним пришел – первым ушел.
- RANDOM – случайный выбор из очереди.

Также реализована возможность выбора варианта закона обслуживания в УК и КС: случайный закон, который задается экспоненциальным распределением времени обслуживания, и детерминированный.

Рассмотрим особенности реализации моделирующей программы.

К входу каждого узла ВК подключается генератор ТП, генерирующий поток с интенсивностью λ_i^T , $i = \overline{1, n}$. К первому узлу ВК от отдельного генератора поступают также пакеты ВП.

В адресное поле пакетов ВП записывается идентификатор $J=n+1$. Пакетам транзитного потока, поступающим на i -й узел и покидающим ВК после обработки в j -м узле, присваивается идентификатор $J=j$, $j = \overline{1, n}$. После обработки пакета на каждом узле проверяется адресное поле пакета. Если j -й адрес соответствует номеру узла или меньше, то пакет передается на следующий узел. В конце маршрута после обработки пакетов в n -ом УК, если идентификатор $j > n$, то пакет отправляется в сумматор пакетов ВП, доставляемых адресату для последующей статистической обработки. Такой способ идентификации пакетов позволяет унифицировать процедуру их обработки на каждом узле независимо от типа потока, которому принадлежит данный пакет.

Модель ВК строится по принципу особых состояний, которые необходимы для правильного воспроизведения времени доставки пакетов. В силу того, что УК и КС представлены одинаковой формализованной схемой, выделяется три особых состояния [3]:

- возникновение требования на передачу пакетов (приход пакета в систему);
- возникновение требования на ожидание в очереди УК или КС;
- поступление требования на обслуживание прибором УК или КС.

Первое состояние для КС возникает при окончании обслуживания пакетов в УК и является окончанием обработки на УК.

Поиск состояний производится по их последовательности в модели. Модули состояний получают управление от программы-диспетчера, в которой изменение каждого состояния анализируется и отражается в базе данных имитационной модели. После окончания работы модуля обработки в соответствии с последовательностью событий программа-диспетчер передает управление следующему модулю обработки состояния [16, 17].

Механизм ведения системного перехода заключается в том, что программа-диспетчер просматривает активизации каждого устройства, начиная с первого в первом узле, и заканчивает последним в последнем узле. Под активизацией понимается занятие устройства пакетом. В таком случае идентификатор активизации ставится в положение (true). После завершения перехода пакета в следующее устройство идентификатор ставится в положение (false).

Для каждого узла предусмотрено три идентификатора активизации: первый – для устройства УК, указывающий на занятость УК обслуживанием пакета; второй – для очереди, указывающий на освобождение УК (КС); третий – для устройства КС, указывающий на занятость КС передачей пакета.

Программа-диспетчер передает управление в очередное устройство при условии активизации предыдущего, в нем проверяет системное время, которое соответствует особым состояниям, присущим устройству, и передает управление особому состоянию, имеющему минимальное время поступления.

Процедуры по обслуживанию и ожиданию на УК (КС) следят за регистрацией поступающих пакетов в очереди устройства за их обслуживанием в УК и КС, сравнивая момент поступления очередного пакета и момент окончания обслуживания предыдущего.

При достижении пакета ВП своего адресата вычисляется разность (Time–Start), которая характеризует время транспортировки пакета по ВК.

Программа-диспетчер следит за удалением транзитных пакетов, не продолжающих продвижение по маршруту после их обслуживания в УК.

Ведение баз данных включает следующие основные операции над данными:

- перенос пакета в очередь УК;
- выбор пакета из очереди УК для обслуживания и активизации устройства УК; в модели с приоритетом повышаются приоритеты пакетов, стоящих перед выбранными;
- перенос пакета с устройства УК в очередь КС, если адрес пакета направляет его к следующему узлу; деактивизация устройства УК;
- выбор пакета из очереди КС для передачи и активизации устройства КС;
- перенос пакета из КС и деактивизация КС.

Сбор и обработка выборочных данных выполняется процедурами, которые дополняют друг друга для получения основных характеристик ВК и обеспечивают:

- сбор информации для вычисления вероятностей потерь в каждом буфере, входящем в ВК (УК и КС), построение распределения потерь в зависимости от емкости буфера;
- сбор времен доставки пакетов для последующего построения распределения времени транспортировки пакетов по ВК.

Эксперимент на модели виртуального канала

Задача постановки эксперимента выглядит следующим образом.

1. Выполнить оценку среднего времени доставки пакета $\bar{t}_{\text{дост}}$ по ВК как оценку математического ожидания $M(\bar{t}_{\text{дост}})$ и дисперсии $D(\bar{t}_{\text{дост}})$. Сравнить полученные значения имитационной модели с результатами аналитического моделирования ВК в виде системы массового обслуживания. Результат представить в виде $\bar{t}_{\text{дост}} = f(\lambda^B, \|\lambda_{ij}^T\|, \mu_i^{\text{УК}}, v_i, i = \overline{1, N})$, где $\mu_i^{\text{УК}}$ – производительность i -го узла коммутации; v_i – скорость i -го канала связи.
2. Построить гистограмму функции распределения времени доставки пакета по ВК для:
 - экспоненциального закона обслуживания во всех УК;
 - для равномерного закона обслуживания во всех УК.
3. Оценить необходимый объем буферной памяти \bar{L}_i для каждого УК и соответствующее время ожидания $\bar{T}_{\text{ож}_i}, i = \overline{1, 5}$. Результат получить в виде $\bar{L}_i = f(\lambda^B, \|\lambda_{ij}^T\|, \mu_i^{\text{УК}}, v_i, i = \overline{1, N})$.

Исходными данными проведения эксперимента стали следующие:

- число узлов ВК, $N=5$;
- число каналов связи, $C=(N-1)=4$;
- матрица тяготений $\|\lambda_{ij}^T\|$ интенсивностей транзитных потоков, $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$

$$\|\lambda_{ij}^T\| = \begin{bmatrix} 200 & 100 & 50 & 30 & 0 \\ 0 & 120 & 50 & 30 & 20 \\ 0 & 0 & 60 & 25 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 30 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix};$$

- интенсивность выделенного потока $\lambda^B=10$ пак/мс;
- длина пакета 256 Б;
- пропускная способность всех каналов связи одинакова и равна 400 пак/мс;
- производительность всех УК одинакова, $\mu_{i=\overline{1,5}} = 250$ пак/мс;
- количество экспериментов 10 000.

Результаты эксперимента на модели ВК приведены в табл. 1.

Номер узла коммутации	Имитационная модель виртуального канала		Аналитическая модель виртуального канала в виде системы массового обслуживания
	$M(t_{\text{дост}})$	$D(\bar{t}_{\text{дост}})$	$\bar{t}_{\text{дост}}$
1	0,02677	10^{-6}	0,025
2	0,052	10^{-5}	0,05
3	0,01298	10^{-6}	0,0125
4	0,01843	10^{-6}	0,0182
5	0,00689	10^{-6}	0,006

Таблица 1. Сравнительные результаты имитационного и аналитического моделирования $\bar{t}_{\text{дост}}$

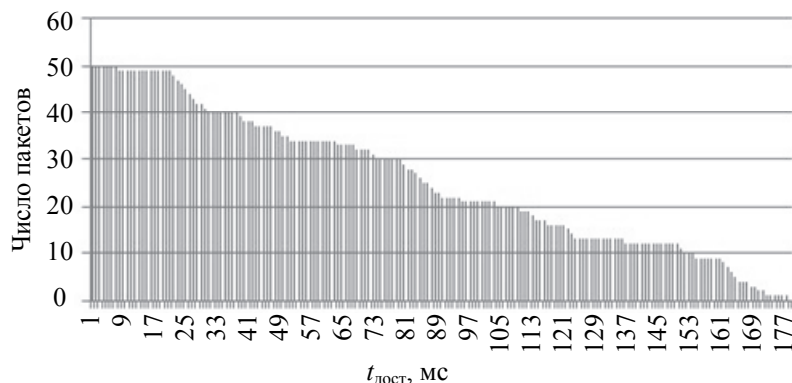


Рис. 4. Гистограмма функции распределения $t_{\text{дост}}$ пакета по виртуальному каналу

для экспоненциального закона обслуживания в узлах коммутации

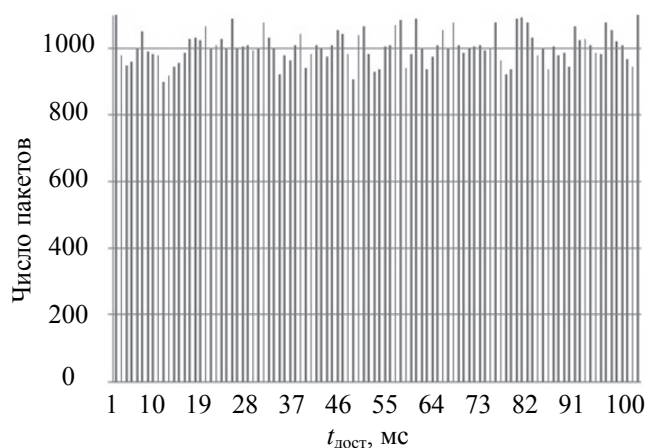


Рис. 5. Гистограмма функции распределения $t_{\text{дост}}$ пакета по виртуальному каналу для равномерного закона обслуживания в узлах коммутации (100 000 экспериментов)

На рис. 4 и 5 приведены гистограмма функции распределения $t_{\text{дост}}$ в мс при экспоненциальном законе обслуживания в УК и гистограмма функции распределения $t_{\text{дост}}$ в мс при равномерном законе обслуживания во всех УК соответственно.

Результаты эксперимента по оценке объема буферной памяти представлены в табл. 2, вероятность потери пакета (отказа) принималась равной 10^{-7} .

Номер узла коммутации	Имитационная модель виртуального канала		Аналитическая модель виртуального канала в виде системы массового обслуживания	
	\bar{L}	$\bar{T}_{\text{ож}}$	\bar{L}	$\bar{T}_{\text{ож}}$
1	6	0,0287	5	0,021
2	11	0,0511	11	0,046
3	2	0,0092	2	0,0085
4	3	0,0151	3	0,0142
5	2	0,0033	1	0,0021

Таблица 2. Сравнительные результаты имитационного и аналитического моделирования \bar{L}

Сходимость результатов аналитического и имитационного моделирования позволяет сделать выводы о возможности применения имитационной модели ВК как вычислительного инструмента для оценки вероятностно-временных характеристик инфокоммуникационной сети.

Заключение

Предложено для оценки вероятностно-временных характеристик инфокоммуникационной сети применять имитационное моделирование, позволяющее учесть динамические и стохастические аспекты ее функционирования.

Для снижения размерности имитационной модели предложен подход, основанный на декомпозиции инфокоммуникационной сети на множества виртуальных каналов. Тогда топологически полная инфокоммуникационная сеть заменяется имитационной моделью виртуального канала, соединяющего источник и адресат, а вероятностный эквивалент нерассматриваемой части сети заменяется генератором внешних потоков. В связи с этим предложены:

- алгоритм расчета значения интенсивностей потоков, приходящих на транзитные узлы виртуального канала из нерассматриваемой части сети;
- имитационная модель виртуального канала.

Имитационная модель виртуального канала является программой, копии которой могут быть использованы для моделирования различных по параметрам сегментов инфокоммуникационной сети.

Анализ результатов проведенного эксперимента показывает, что предлагаемая имитационная модель виртуального канала может быть полезна как средство для планирования вычислительных ресурсов и прогнозирования показателей качества по доставке информации в инфокоммуникационной сети.

Литература

1. Кутузов О.И., Сергеев В.Г., Татарникова Т.М. Коммутаторы в корпоративных сетях. Моделирование и расчет. СПб.: Судостроение, 2003. 170 с.
2. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Подход к оптимизации структуры межсетевых устройств с привлечением генетических алгоритмов // Известия СПбГЭТУ. 2006. № 1. С. 61–67.
3. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик. СПб.: ГУАП, 2015. 381 с.
4. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций. СПб.: РГМУ, 2012. 134 с.
5. Tatarnikova T., Kolbanev M. Statement of a task corporate information networks interface centers structural synthesis // IEEE EUROCON 2009. St. Petersburg, 2009. Art. 5167903. P. 1883–1887. doi: 10.1109/EURCON.2009.5167903
6. Zwart A.P. Queueing Systems with Heavy Tails. Eindhoven University of Technology, 2001. 227 p.
7. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. К оцениванию и сопоставлению очередей классических и фрактальных систем массового обслуживания // Информационно-управляющие системы. 2016. Т. 81. №2. С. 48–55.
8. Bakin E., Solovyeva A., Turlikov A., Andreev S. Average delay estimation in discrete-time systems with periodically varying parameters // Lecture Notes in Computer Science. 2013. V. 7984. P. 37–51.
9. Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Попцова Н.А., Паршутин С.А., Воронина Д.А., Богатырев С.В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5(105). С. 831–838. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838
10. Татарникова Т.М. Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3 (76). С. 92–98.
11. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Резервированная передача данных через агрегированные каналы в сети реального времени // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 9. С. 735–740. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-9-735-740
12. Колбанев М.О., Татарникова Т.М., Малков К.О. Подход к организации адаптивного согласующего центра корпоративной сети // Информационно-управляющие системы. 2008. № 3. С. 28–31.
13. Советов Б.Я., Колбанев М.О., Татарникова Т.М. Оценка вероятности эрланговского старения информации // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6. С. 25–28.
14. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Модель резервированного обслуживания запросов реального времени в компьютерном кластере // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 5. С. 348–355.
15. Kleinrock L. Communication Nets: Stochastic Message Flow and Design. McGraw-Hill, 1964. 220 p.
16. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Надежность функционирования кластерных систем реального времени с фрагментацией и резервированным обслуживанием запросов // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 6. С. 409–416.
17. Татарникова Т.М., Яготинцева Н.В. Оценка функциональной надежности корабельной сети передачи данных // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. № 9. С. 62–66.

Авторы

Татарникова Татьяна Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, tm-tatarn@yandex.ru

Елизаров Максим Андреевич – аспирант, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, elizarovmaks@gmail.com

References

1. Kutuzov O.I., Sergeev V.G., Tatarnikova T.M. *Kommutatory v Korporativnykh Setyakh. Modelirovanie i Raschet* [Switches in the Corporate Networks. Simulation and Calculation]. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 2003, 170 p.
2. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Optimization of multiprocessor system on the basis of genetic algorithms. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2006, no. 1, pp. 61–67. (In Russian)
3. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Infocommunication Networks. Simulation and Evaluation of Probability-Time Characteristics*. St. Petersburg, SUAI Publ., 2015, 381 p. (In Russian)
4. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Modelling of Systems and Telecommunication Networks*. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2012, 134 p. (In Russian)
5. Tatarnikova T., Kolbanev M. Statement of a task corporate information networks interface centers structural synthesis. *IEEE EUROCON 2009*. St. Petersburg, 2009, art. 5167903, pp. 1883–1887. doi: 10.1109/EURCON.2009.5167903
6. Zwart A.P. *Queueing Systems with Heavy Tails*. Eindhoven University of Technology, 2001, 227 p.
7. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Evaluation and comparison of queues in classical and fractal queueing systems. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2016, vol. 81, no. 2, pp. 48–55. (In Russian)
8. Bakin E., Solovyeva A., Turlikov A., Andreev S. Average delay estimation in discrete-time systems with periodically varying parameters. *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, vol. 7984, pp. 37–51.
9. Bogatyrev V.A., Karmanovsky N.S., Poptcova N.A., Parshutin S.A., Voronina D.A., Bogatyrev S.V. Simulation model for design support of infocomm redundant systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 831–838. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838
10. Tatarnikova T.M. Structural synthesis of an interface center for corporate networks. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2015, no. 3, pp. 92–98. (In Russian)
11. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Redundant data transmission using aggregated channels in real-time network. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 735–740. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-9-735-740
12. Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M., Malkov K.O. An approach to set up a corporate network matching center. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2008, no. 3, pp. 28–31. (In Russian)
13. Sovetov B.Ya., Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. Evaluation of probability of erlang information aging. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 6, pp. 25–28. (In Russian)
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. The model of redundant service requests real-time in a computer cluster. *Informatsionnye Tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 5, pp. 348–355. (In Russian)
15. Kleinrock L. *Communication Nets: Stochastic Message Flow and Design*. McGraw-Hill, 1964, 220 p.
16. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. The reliability of the cluster real-time systems with fragmentation and redundant service requests. *Informatsionnye Tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 6, pp. 409–416. (In Russian)
17. Tatarnikova T.M., Yagotinceva N.V. Evaluation of functional reliability of shipboard network. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 9, pp. 62–66. (In Russian)

Authors

Tatiana M. Tatarnikova – D.Sc., Associate professor, Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, tm-tatarn@yandex.ru

Maksim A. Elizarov – postgraduate, Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, elizarovmaks@gmail.com