

УДК 621.39

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМАХ МАРШРУТИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРА КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

© К.А. Литвинов, И.И. Пасечников

Ключевые слова: имитационное моделирование информационной сети; телекоммуникационная сеть; КПД в смысле передачи информации.

Осуществлена оценка информационной эффективности телекоммуникационной сети (ТКС) при использовании различных алгоритмов маршрутизации: имитационная модель информационной сети предназначена для определения основных характеристик путем моделирования основных процессов канального и сетевого уровня сегмента ТКС. В качестве показателей информационной эффективности используются: производительность ТКС, средняя временная задержка передаваемых пакетов, потери (в виде количества не дошедших до адресата пакетов) и коэффициент полезного действия (КПД) ТКС в смысле передачи информации. Для получения КПД ТКС в смысле передачи информации используется кибернетическая мощность ТКС.

Целью работы является определение информационной эффективности телекоммуникационной сети (ТКС) с использованием коэффициента полезного действия (КПД) сети в смысле передачи информации.

Топология сети представлена случайным графом $G(V,E)$, где V – множество вершин графа, а E – множество его ребер. Для реализации информационного обмена в модели используется дискретное системное время, при этом имитация процессов реализуется через равные промежутки времени – тики.

Считается, что для каждой линии связи существует отдельный канал для передачи служебной информации. При этом служебная информация имеет малый размер, а каналы ее передачи способны обрабатывать всю служебную информацию практически мгновенно, поэтому в модели не учитывается время обработки служебной информации. При маршрутизации предполагается, что маршрутизатор всегда обладает своевременной текущей информацией. Цифровые каналы связи (ЦКС), характеризующие ребра графа, представляются каналами с памятью. В результате каждый узел, соответствующий вершине графа, имеет в своем составе буферное запоминающее устройство БЗУ (для хранения входящих пакетов) и запоминающее устройство (ЗУ) цифрового канала связи.

Входной поток пакетов задается в виде пуассоновского потока, который генерируется для каждого узла. Протокол обслуживания в буфере устройства основывается на принципе «первый пришел – первый вышел». На каждом шаге моделирования происходит расчет необходимых параметров оценки качества ТКС.

Алгоритм работы сети состоит в выполнении следующих шагов.

Шаг 0. Подготовка к моделированию. Генерация графа сети и всех параметров сети, сохранение значений параметров в файл.

Шаг 1. Инициализация сети. Загрузка графа из файла. Инициализация констант и всех необходимых параметров сети.

Шаг 2. Решение задачи маршрутизации (выбор кратчайших путей).

Шаг 3. Имитация процессов передачи пакетов (моделирование задач канального уровня модели OSI).

Шаг 4. Сбор статистики, показателей качества работы ТКС, расчет полной и мгновенной кибернетической мощности информационной сети.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ

Граф ТКС $G(V,E)$ формируется случайным образом путем использованием параметра p – вероятности существования связи между узлами сети. Дополнительным ограничением для графа служит параметр k – связность сети. Алгоритм генерации топологии состоит в выполнении следующей последовательности операций.

Шаг 1. Инициализация системы.

Шаг 2. Генерация n узлов.

Шаг 3. Генерация случайного количества связей между узлами сети на основе вероятности p .

Шаг 4. Проверка связности [1] сети с помощью алгоритма поиска максимального потока на графе (алгоритм Диница [2]).

Шаг 5. Если сеть k -связана, то сгенерированный граф сохраняется в файл, иначе переход к шагу 3.

В результате, формируется топология, которая удовлетворяет одновременно параметрам p и k .

ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ ВХОДНОГО ПОТОКА ПАКЕТОВ

Пуассоновский поток входящих в сеть пакетов задается интенсивностью:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где λ_i – интенсивность пуассоновского потока пакетов для i -го узла сети. В модели предполагается равновероятное распределение пакетов между всеми узлами коммутации сети (УК).

Алгоритм генерации входного потока пакетов для i -го узла сети описывается следующей последовательностью шагов.

1. Исходя из заданного значения и условия равновероятного распределения входного потока пакетов между узлами, для каждого узла вычисляется интенсивность:

$$\lambda_i = \frac{\Lambda}{n},$$

и соответствующий средний интервал между поступлением пакетов:

$$\Delta t_i = 1 / \lambda_i.$$

2. Для каждого узла сети генерируется время ожидания следующего пакета в соответствии с распределением Пуассона [3]. Средний интервал между поступлением пакетов для каждого узла определяется общей интенсивностью и количеством узлов, т. е.

$$\Delta t = \frac{n}{\Lambda} [c].$$

3. Для каждого тика: если сетевое время больше или равно времени ожидания для i -го узла сети, то генерируется пакет, который помещается в его буфер. В противном случае – переход к шагу 2.

ПРАВИЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАКЕТОВ В УК

Изъятие пакетов из буфера запоминающего устройства (БЗУ) осуществляется исходя из протокола обслуживания «первый пришел – первый вышел» (основан на типе данных очередь [4]). При поступлении в узел пакетов из канала связи (КС), они направляются БЗУ. В соответствии с протоколом передачи очередной пакет изымается из очереди БЗУ и помещается в буфер для передачи по каналу связи. При этом в текущий момент времени имитируется его передача по КС с соответствующей задержкой (в зависимости от скорости передачи по КС). В результате успешной передачи пакета последний удаляется из очереди узла отправителя (ЗУ КС) и помещается в очередь БЗУ узла получателя. В случае неудачной передачи пакет откладывается в буфер ожидания и изымается из него через случайный промежуток времени.

Алгоритм изъятия пакетов из БЗУ и ЗУ КС в процессе их передачи по КС включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Анализируется занятость ЦКС. Если время ожидания пакетов в ЗУ КС подошло к концу, то реализуется процесс передачи. Иначе извлекается пакет из БЗУ узла-отправителя и реализуется процесс передачи.

Шаг 2. При успешной передаче пакеты изымаются из БЗУ узла отправителя и буфера его КС и помещают-

ся в БЗУ узла получателя. В противном случае увеличивается значение счетчика попытки отправки пакета до значения k .

Шаг 3. В случае, если пакет отправлялся неудачно $k = 5$ раз, то изъять пакет из ЗУ КС и поместить его в буфер ожидания. Задать случайное время ожидания пакета в буфере ожидания. Перейти к шагу 1.

АЛГОРИТМ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ В СЕТИ

Передающий и приемный узлы (устройства) построены по принципу конечных автоматов. Процесс их взаимодействия описывается следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Все устройства сети – в режиме инициализации.

Шаг 2. Во всех устройствах, имеющих пакеты для передачи в буферах, извлекаются пакеты из БЗУ и перемещаются в буферы передатчиков. При этом посылаются запросы приемным узлам в соответствии с таблицей маршрутизации. Приемники находятся в режиме приема запросов от всех передатчиков в соответствии с топологией сети.

Шаг 3. После передачи запросов передающие устройства находятся в режиме ожидания ответа. Приемник обрабатывает запрос и посылает ответ – разрешение на передачу узлу отправителю. В случае поступления на прием узлу нескольких запросов одновременно приемником выбирается один из них случайным образом. Эта задача решается с помощью протокола единичного захвата пакета.

Шаг 4. При получении передающим узлом разрешения на передачу он начинает транзакцию обработки пакета. Приемное устройство узла получателя реализует прием захваченного пакета путем помещения его в БЗУ. В случае отсутствия такого (в интервале рассмотрения) передающий узел переходит в состояние «ожидание».

Шаг 5. Передатчик отправляет пакет непрерывно в течение необходимого количества тиков, в то время как приемник принимает пакет. Данный процесс продолжается, пока пакет полностью не передается. Количество тиков для передачи пакета вычисляется следующим образом:

$$N_{тик} = \frac{S}{V * \Delta t_{тик}},$$

где S – размер пакета в битах; V – скорость передачи информации КС в бит/с; $\Delta t_{тик}$ – продолжительность тика в секундах.

Шаг 6. Фаза завершения приема и отправки. Переход обоих устройств в состояние «ожидание».

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

ПРОЦЕСС РАСЧЕТА РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Для оценки качества работы способов маршрутизации рассматриваются следующие сетевые характеристики: временная задержка пакетов, производительность ТКС, информационные потери, суммарное накопление в узлах коммутации, кибернетическая мощность ТКС.

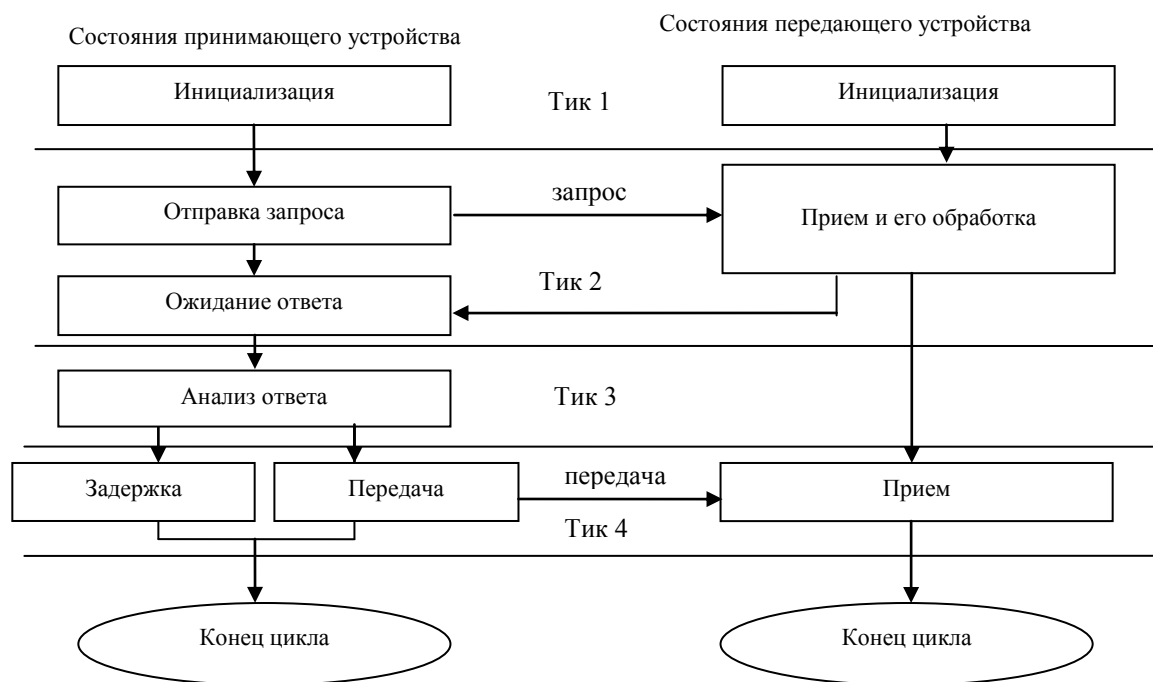


Рис. 1. Схема взаимодействия передающего и принимающего устройства

Временная задержка

Каждый пакет имеет время его рождения t_p и время доставки адресату t_d . Время рождения дается пакету при поступлении его в сеть. Время доставки – время доведения пакета конечному адресату. Исходя из постановки задачи, временная задержка для (i, k) -пары определяется выражением:

$$T_{ik} = t_d - t_p.$$

Средняя временная задержка определяется:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n T_{ik}}{L_d},$$

где L_d – количество доставленных пакетов.

Производительность сети

Производительность сети определяется количеством доставленных адресатам пакетов за единицу времени.

Информационные потери

Информационные потери количественно характеризуются числом потерянных пакетов и рассчитываются как разность поступивших в сеть пакетов и доставленных пакетов при заданной интенсивности входного потока:

$$L_n = L - L_d.$$

Суммарное накопление

Суммарное накопление определяется суммой длин всех очередей БЗУ в сети.

Кибернетическая мощность ТКС и КПД в смысле передачи информации

Кибернетическая мощность ТКС определяется выражением [5]:

$$P_{ИС} = NG|_{T_d},$$

где N – количество пакетов, находящихся в ТКС и определяемое как сумма пакетов в БЗУ УК и БЗУ КС (т. е. находящихся в режиме передачи); G – производительность сети; T_d – ограничение на временную задержку пакетов в сети (в модели это соответствует времени жизни пакетов в ТКС). Для определения КПД в смысле передачи информации используется выражение [5]

$$\eta = \frac{P_{ИС}}{P_{ИС_{ид}}},$$

где $P_{ИС_{ид}}$ – кибернетическая мощность модели идеальной ТКС. Ее можно найти, если сеть представить в виде определенным образом соотносящихся одноканальных систем (ОС).

Количество пакетов в ОС определяется формулой Литтла, на основе использования усредненных величин:

$$N = \gamma T,$$

где γ – интенсивность входного потока; T – среднее время нахождения пакета в ОС. В рассматриваемом случае $T \equiv T_d$. Очевидно, предельно возможная, теоретически допустимая мощность ТКС определяется суммой мощностей каждого элемента сети, т. е. ОС. Так

как скорости передачи по КС заданы величиной V (значение пропускной способности), то при фиксированном размере пакета S (в битах) производительность OCR_i – количество пакетов, обслуживаемое в единицу времени ОС, при заданном T_0 будет вычисляться:

$$R_i = \frac{V}{S}.$$

Учитывая то, что N_i – количество пакетов в ОС есть число пакетов БЗУ и один пакет в обслуживаемом устройстве – канале связи, то при заданном ограничении T_0 в ОС может находиться не более $N_{i_{max}}$ пакетов (остальные уничтожаются, т. к. время жизни пакета становится больше T_0). В результате:

$$P_{КС_{ид}} = \sum_{i=1}^{n_{OC}} N_{i_{max}} R_i |_{T_0},$$

где n_{OC} – количество ОС в модели идеальной ТКС. Таким образом, значение информационной мощности модели идеальной КС соответствует значению полной кибернетической мощности ТКС.

МАРШРУТИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ ТКС

В качестве алгоритма маршрутизации используется алгоритм, основанный на построении кратчайших путей. В процессе решения задачи маршрутизации применяются таблицы маршрутизации (ТМ). При этом каждый узел сети имеет свою собственную ТМ, которая, в зависимости от алгоритма маршрутизации, может быть статической или динамической. Модель предусматривает применение различных алгоритмов маршрутизации. В связи с этим алгоритмы маршрутизации могут взаимодействовать с моделью КС только посредством ТМ, тем самым изменяя движение пакетов в сети. В ячейках таблицы хранится следующий узел, на который должен быть перенаправлен пакет после текущего (что соответствует таблице соседей).

А. Алгоритм маршрутизации, основанный на кратчайших путях

Особенность алгоритма маршрутизации состоит в следующем:

- движение пакетов из i -го узла в j -му только по одному маршруту;
- неизменность маршрутов движения пакетов (статичность ТМ).

Процедуре выбора маршрутов пакетов предшествует процедура построения ТМ для каждого узла, при этом сформированная ТМ остается неизменной до окончания моделирования. Процесс построения ТМ включает:

Шаг 1. Выбор метрики из вариантов: обобщенный показатель, скорость передачи данных в каналах связи, количество транзитных участков.

Шаг 2. Поиск кратчайших путей в графе между всеми вершинами на основе одной из метрик с помощью алгоритма Флойда–Уоршелла [6].

Шаг 3. Проход по ребрам всех полученных путей и заполнение соответствующих таблиц маршрутизации.

На каждом шаге алгоритм генерирует матрицу M . Матрица M содержит длины кратчайших путей между всеми вершинами графа. Перед работой алгоритма

матрица M заполняется длинами ребер графа. В реальных сетях для определения кратчайших путей используется асинхронный алгоритм Беллмана–Форда. Но в силу того, что алгоритм Беллмана–Форда и алгоритм Флойда–Уоршелла генерируют одинаковые кратчайшие пути, а алгоритм Флойда–Уоршелла имеет более высокую скорость расчетов при моделировании [1], то последний был выбран как основной алгоритм для поиска кратчайших путей.

Б. Алгоритм маршрутизации, основанный на кратчайших путях с учетом накоплений

Особенностью алгоритма маршрутизации является относительная динамичность (каждые 30 с маршрут перестраивается в зависимости от текущей сетевой обстановки). Построение кратчайших путей осуществляется на основе пропускных способностей каналов. В случае, если существуют несколько кратчайших путей, выбирается тот, который имеет наименьшее суммарное накопление на всех транзитных участках. Вместо пропускных способностей она должна содержать пары чисел: пропускная способность – накопление (далее по тексту ПСН-пара). Причем накопление считается как сумма накоплений в БЗУ, соединенных соответствующими КС. Для каждой введены операции сравнения. ПСН-пара больше другой пары в том случае, если пропускная способность первой пары больше пропускной способности второй. Если пропускные способности ПСН-пар равны, первая пара больше второй в том случае, когда накопление первой пары больше накопления второй. Если накопления и пропускные способности ПСН-пар равны, то пары считаются равными. Работа алгоритма построения состоит в следующем.

Шаг 1. Заполнение таблицы смежности графа парами чисел ПСН.

Шаг 2. Поиск кратчайших путей на графе с помощью алгоритма Флойда–Уоршелла [6].

Шаг 3. Проход по ребрам всех полученных путей и заполнение соответствующих таблиц маршрутизации.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРШРУТИЗАЦИИ, ОСНОВАННОЙ НА ПОИСКЕ КРАТЧАЙШИХ ПУТЕЙ НА ГРАФЕ

Исходные данные моделирования: время моделирования 600 с, дискретность системного времени 1 мс, размер пакета 400 бит, время жизни пакета 1 с, пропускные способности каналов 64000 бит/с, количество узлов 8, топология сети показана на рис. 2, алгоритм маршрутизации А, алгоритм маршрутизации Б.

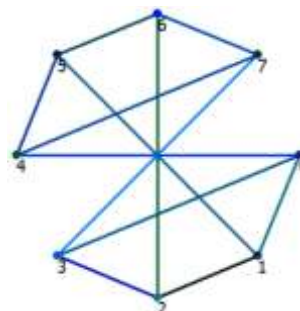


Рис. 2. Топология графа ТКС

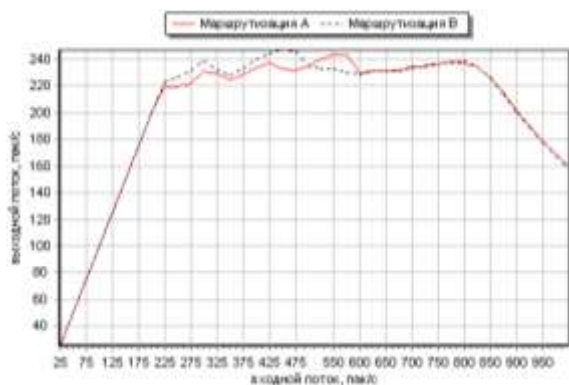


Рис. 3. Производительность модели ТКС

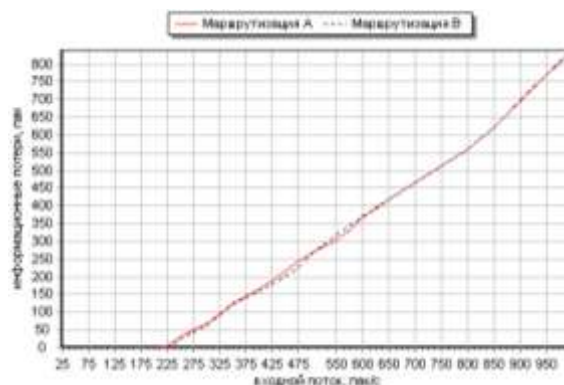


Рис. 6. Информационные потери

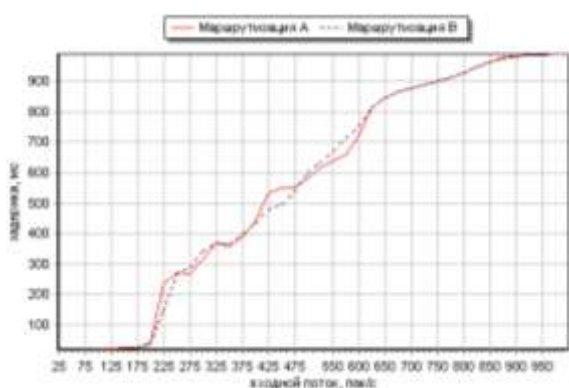


Рис. 4. Задержка в модели ТКС

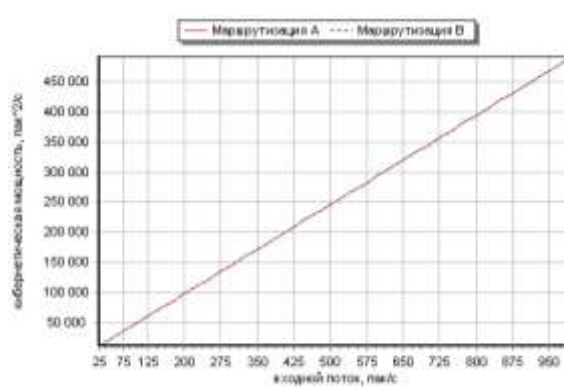


Рис. 7. Кибернетическая мощность идеальной модели информационной сети

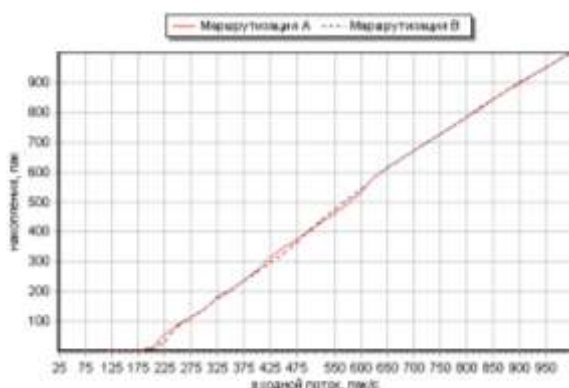


Рис. 5. Суммарное накопление в модели информационной сети

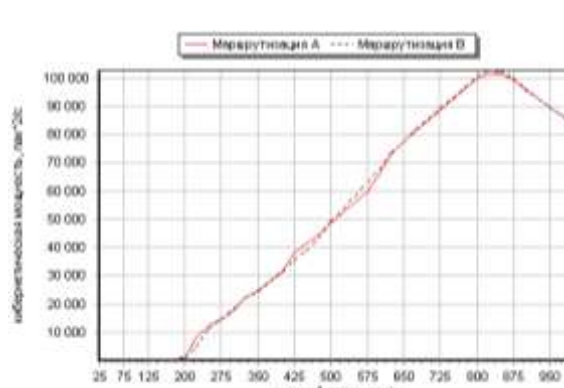


Рис. 8. Кибернетическая мощность ТКС, полученная в результате моделирования

Для идеальной модели ТКС (состоящей из несоединенных ОС) одновременно могут передаваться только n_{OC} пакетов, где n_{OC} – число узлов в сети. При этом ее максимальная теоретически достижимая при заданных условиях равна (при $n_{OC} = 12$):

$$G = n_{OC} \frac{V}{S} = 12 \cdot \frac{64000}{400} = 1920 \frac{pac}{c}.$$

На рис. 3–9 представлены результаты моделирования. Из рис. 3–9 видно три явно выраженных участка

поведения сети, характеризующиеся следующими особенностями.

Сеть не нагружена (входной поток 0–200 пак/с). Этот участок характеризуется почти линейным возрастанием производительности в силу того, что соседние потоки пакетов практически не мешают друг другу.

Данные передаются без длительного хранения, время доведения пакетов минимально.

Сеть нагружена (входной поток 200–800 пак/с). Данный участок графиков характеризуется колебанием производительности в коридоре 220–240 пак/с. Наблю-

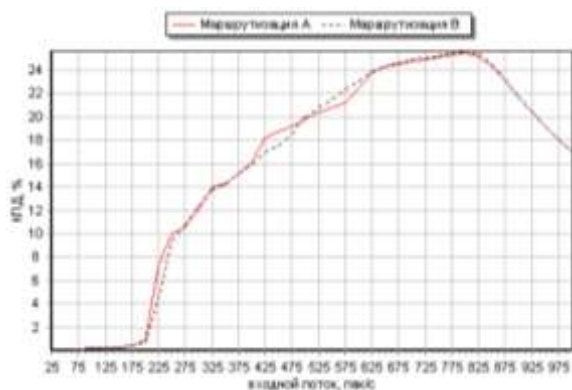


Рис. 9. КПД информационной в смысле передачи информации

дается резкий рост времени доведения пакетов. Суммарные накопления в узлах сети возрастают. Появляются информационные потери пакетов.

Сеть перегружена (входной поток более 800 пак/с), при этом задержки пакетов стремятся к их времени жизни. Информационные потери и суммарные накопления приобретают линейную зависимость от входного потока. Производительность снижается из-за влияния соседних потоков (в силу отсутствия решения задачи динамической маршрутизации).

Оценка информационной эффективности ТКС с использованием значения кибернетической мощности модели ТКС и КПД в смысле передачи информации показана на рис. 7–9. Размерность мощности пак²/с обозначена на рис. 7–9 в виде пак/с.

Алгоритмы маршрутизации ведут себя практически одинаково, т. к. при моделировании не используются методы динамической маршрутизации.

Результаты показывают одинаковые характерные особенности поведения сети как при использовании общеизвестных показателей информационной эффек-

тивности. При этом дополнительной особенностью

является то, что КПД сети в смысле передачи информации показывает степень близости сети к идеальной. В связи с этим применение обобщенных показателей – мощность сети и КПД сети в смысле передачи информации, является необходимым с целью определения степени качества функционирования сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с.
2. Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988. 137 с.
3. Кнут Д. Искусство программирования: в 4 т. М.: Вильямс, 2010. Т. 2. 832 с.
4. Ахо А., Хопкрофт Д., Ульман Д. Структуры данных и алгоритмы. М.: Вильямс, 2010. 400 с.
5. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. М.: Машиностроение, 2004. 216 с.
6. Белоусов А.И. Дискретная математика. М., 2004. 744 с.

Поступила в редакцию 28 января 2015 г.

Litvinov K.A., Pasechnikov I.I. INFORMATIONAL EFFICIENCY OF THE MODEL OF THE NET WITH DIFFERENT ROUTING ALGORITHMS AND CYBERNETIC POWER OF THE NET

Was estimated the informational efficiency of the telecommunications net (TCN) at use of different algorithms of routing: imitational model of informational net is for defining basic characteristics by modeling basic processes of canal and net level of segment TCN. As indicators of informational efficiency are used: productivity of TCN, average time delay of transferring packets, loses (as amount of non delivered to the destination packets) and coefficient of useful efficiency (CUE). TCN as for transferring information. For getting CUE TNC as transferring information are used cybernetic power of TCN.

Key words: imitational modeling of informational net; telecommunications net; TCN as for transferring information.

Литвинов Кирилл Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра алгебры и геометрии, e-mail: aib@tsu.tmb.ru

Litvinov Kirill Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Algebra and Geometry Department, e-mail: aib@tsu.tmb.ru

Пасечников Иван Иванович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общей физики, e-mail: pasechnikov_ivan@mail.ru

Pasechnikov Ivan Ivanovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Professor of General Physics Department, e-mail: pasechnikov_ivan@mail.ru