

4. Василенко М. Н. Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов и др. // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 17–25.

5. Лазарев В. Г. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. – М. : Энергия, 1984. – 408 с.

6. Марков Д. С. Метод порционного моделирования транспортных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, В. Б. Соколов // Развитие элементной базы и совершенствование методов

построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 43–47.

7. Марков Д. С. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 1. – С. 23–28.

8. Марков Д. С. Определение загрузки станций и узлов Петербургского метрополитена в экспертной системе / Д. С. Марков, В. А. Яковлев, В. Б. Соколов // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 45–50.

УДК 621.39

**А. К. Канаев, М. М. Лукичев**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

**А. А. Муравцов**

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

## **СИНТЕЗ ПОТОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Рассматривается формирование имитационной модели путем синтеза потоковой структуры и имитационного аппарата систем массового обслуживания на языке GPSS Word, позволяющее определить такие параметры качества транспортной сети, как математическое ожидание задержки пакетов, ее среднеквадратичное отклонение, а также гистограмму распределения задержки предложенной к рассмотрению сети связи. Кроме этого, модель позволяет определить участки сети, которые необходимо модернизировать, чтобы удовлетворить потребность пользователей в качественных показателях сети связи.

Имитационное моделирование, телекоммуникационные сети, пакетная коммутация, GPSS Word.

С увеличением потребности в высокоскоростном доступе к информационной среде в значительной степени увеличилась нагрузка на современные транспортные сети, возникли жесткие требования к показателям качества обслуживания в сети. Однако требуется не только определить текущее (проектируемое) состояние транспортной сети, но и рассмотреть ее

возможность сохранять заданные качественные показатели с увеличением потоков нагрузки.

Сегодня для определения вышеуказанных показателей используют:

- измерения и статический анализ реальной сети (если сеть передачи данных уже построена и находится в процессе развития);
- натуральное моделирование;

- математическое моделирование;
- имитационное моделирование [3].

В данной работе рассмотрим имитационное моделирование, выполняемое на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ), которое в настоящее время является наиболее эффективным методом получения информации о поведении системы и действенности альтернативных вариантов ее построения [1]. Например, можно выделить:

- отсутствие существенных вложений в приобретение оборудования для моделирования сети;
- гибкость – т.е. можно либо рассматривать все процессы системы для получения точных результатов, либо вводить рамки, упрощающие модель, для определения порядка интересующих показателей, либо моделировать интересующие фрагменты сети;
- способность быстро менять потоки нагрузки и принципы обслуживания пакетов;
- максимальное приближение результата моделирования к действительности вплоть до детализации процессов.

В качестве примера составим имитационную модель функционирования транспортной сети и определим основные показатели каче-

ства обслуживания клиентов, такие как средняя задержка, девиация задержки, а также укажем наиболее загруженные узлы в данной сети.

### Постановка задачи

Пусть задана телекоммуникационная сеть (ТКС) в виде графа  $G$  (рис. 1), где  $A = \{a_i\}$  представляет собой множество узлов ТКС, а  $B = \{b_i\}$  – множество ребер ТКС. В общем случае направление передачи информации по линиям связи, которые соединяют представленные узлы ТКС, двунаправленно, и соответствующий граф сети ТКС является неориентированным. Также исходными данными для имитационного моделирования являются потоковая структура существующей сети, которая задана в виде графа (рис. 1), сверху ребер которого указана длина линии, снизу – нагрузка на данное ребро. Предположим, что для телекоммуникационной сети передачи данных требуется определить параметры качества обслуживания для необходимой к реализации КП от узла  $a_1$  к узлу  $a_{10}$  со скоростью 10 Мб/с. Кроме этого, установим технологию передачи транспортной сети.

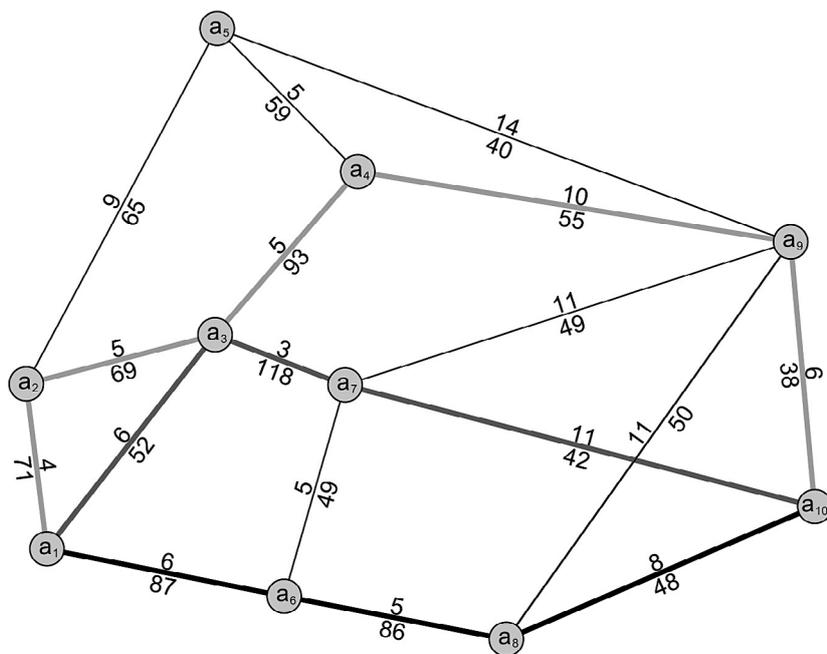


Рис. 1. Потоковая структура рассматриваемой сети

С развитием телекоммуникационного оборудования стало целесообразно использовать технологию пакетной передачи информации, так как данное семейство технологий имеет высокую гибкость, масштабируемость сети, а также меньшую стоимость по сравнению с синхронной передачей информации. Наибольшее распространение получили семейство протоколов и технологий передачи данных – TCP/IP/Ethernet.

### Объект моделирования

Для дальнейшего моделирования также требуется определить способ прохождения пакета через узел обработки информации. Предположим, что в каждом узле (рис. 1) расположен коммутатор с общей шиной (backplane). Данный тип коммутаторов использует для связи портов процессоров высокоскоростную шину, которая функционирует в режиме разделения времени.

После того как данные преобразуются в приемлемый для передачи по шине формат (находясь в буфере интерфейса, принявшего пакет), они помещаются на шину и далее передаются в порт назначения. Производительность backplane шины в современных коммутаторах, по крайней мере, в десять раз превосходит производительность наиболее скоростного интерфейса рассматриваемого оборудования [5]. В рамках рассмотренного принципа обработки пакетов с целью упрощения моделирования, предположим, что модель коммутатора транспортной сети будет содержать только неограниченный по объему буфер интерфейса, передающего пакеты в линию, так как в современном коммутационном оборудовании задержка на обработку пакета минимальна и, как правило, постоянная коммутационная матрица в несколько раз превосходит скорость самого производительного интерфейса, а следовательно, задержка на переход пакета от буфера принимающего интерфейса к буферу передающего также минимальна.

### Составление маршрутов для передачи исследуемого потока

Для исследуемого потока определим три независимых маршрута с помощью алгоритма Дейкстры, а в качестве веса ребер будем использовать длину линий передачи, значения которых указаны сверху над ребрами (рис. 1). Произведя необходимые расчеты, получим кратчайшие маршруты для КП  $a_1 a_{10}$ :

$$M_1^{a_1 a_{10}} = \{b1, 6; b6, 8; b8, 10\} = 19;$$

$$M_2^{a_1 a_{10}} = \{b1, 3; b3, 7; b7, 10\} = 20;$$

$$M_3^{a_1 a_{10}} = \{b1, 2; b2, 3; b3, 4; b4, 9; b9, 10\} = 30.$$

Определив независимые маршруты, рассчитаем распределения потока от КП  $a_1 a_{10}$ . Также для формализации «расцепления» исследуемого потока по нагрузкам, определенным для каждого маршрута, выясним вероятность перехода одного пакета к одному из трех маршрутов. В итоге получим:

$$V_1^{a_1 a_{10}} = \{b1, 6; b6, 8; b8, 10\} = 3,871 \text{ Мб/с};$$

$$P_1 = 0,387;$$

$$V_2^{a_1 a_{10}} = \{b1, 3; b3, 7; b7, 10\} = 3,677 \text{ Мб/с};$$

$$P_2 = 0,368;$$

$$V_3^{a_1 a_{10}} = \{b1, 2; b2, 3; b3, 4; b4, 9; b9, 10\} =$$

$$= 2,452 \text{ Мб/с}; P_3 = 0,245.$$

Для следующего этапа моделирования требуется определить задержку при передаче пакетов от узла-«отправителя» к узлу-«приемнику», которая составляет 5 мкс/км [2].

### Имитационная модель транспортной сети связи

Таким образом, для создания имитационной модели остается определить исходные данные для моделирования – характеристики

входных потоков, а также дисциплину обслуживания данных в узлах сети. Как известно, каждому виду трафика в телекоммуникационных сетях свойствен свой закон распределения интервалов поступления пакетов. Трафику, циркулирующему в современных телекоммуникационных сетях с пакетной коммутацией, присущи свойства самоподобия, что включает в себя долговременную зависимость, медленно затухающую дисперсию, бесконечные моменты, распределение с «тяжелыми хвостами» (распределение Парето, Вейбулла, нормальное распределение) [4]. В данном примере в качестве демонстрации возможностей имитационного моделирования будем рассматривать характер исследуемого потока как экспоненциальный, поток нагрузки – Пуассона и статическую задержку в узлах обработки с незначительной случайной частью.

Значения потоков нагрузки исследуемой транспортной сети определены на рис. 1. Также предположим, что все рассматриваемые интерфейсы оборудования обладают производительностью, равной 100 Мб/с. Для определения математического ожидания времени между моментами формирования пакетов за основу возьмем кадр максимального размера, который вместе с преамбулой имеет длину 1526 байт, или 12208 бит. Период следования составляет  $12208 \text{ бит} + 96 \text{ бит} = 12304 \text{ бит}$ , а частота кадров при скорости передачи 100 Мбит/с составит  $1/123,04 \text{ мкс} = 8127 \text{ кадр/с}$ .

Имитационная модель любой сложной системы состоит из моделей ее элементов, а также моделей взаимодействия элементов между собой и с элементами внешней среды. Применительно к транспортной сети эти взаимодействия (информационные процессы взаимодействия) реализуются по каналам передачи информации. Для решения поставленной задачи произведем имитационное моделирование исследуемой транспортной сети с помощью специальной программы GPSS Word, обладающей максимальной простотой описания моделей данного класса задач, с использованием минимального количества ресурсов ЭВМ.

Упрощенный алгоритм работы программы, отображающей свойства рассматриваемой модели, представлен на рис. 2. Из алгоритма работы имитационной модели видно, что она отображает основные свойства требуемого участка транспортной сети с учетом всех указанных ограничений и допущений. Это означает, что по данному алгоритму может быть составлена программа на языке GPSS Word.

Таким образом, полученная программа отображает основные процессы, протекающие при прохождении исследуемого потока по рассматриваемой транспортной сети и содержит 186 строк.

### Результаты моделирования

После имитационного моделирования программа GPSS Word выдает стандартный отчет, в котором в форме таблицы указаны количество пакетов, прошедших через каждый блок, статистика использования узлов, а также статистика использования буфера интерфейсов.

Из анализа отчета GPSS также можно отметить, что на момент окончания моделирования в буфере интерфейса 1 узла 3 осталось 251 837 пакетов, что говорит о низкой пропускной способности интерфейсов между узлами  $a_3$  и  $a_7$ . Данный результат также подтверждает коэффициент использования данного интерфейса, тоже входящий в отчет GPSS Word, равный 1. Так как поток нагрузки превышает пропускную способность данного узла, очередь в буфере интерфейса 1 узла  $a_3$  будет расти с увеличением времени моделирования. В данном случае требуется либо перераспределить потоковую структуру исходного графа, либо увеличить пропускную способность ребра.

Программа GPSS Word позволяет строить гистограммы по заданным измеряемым величинам. В нашем примере мы фиксировали время прохождения исследуемого потока по каждому маршруту. На рис. 3 отображена гистограмма времени прохождения исследуемого потока по моделируемой транспортной

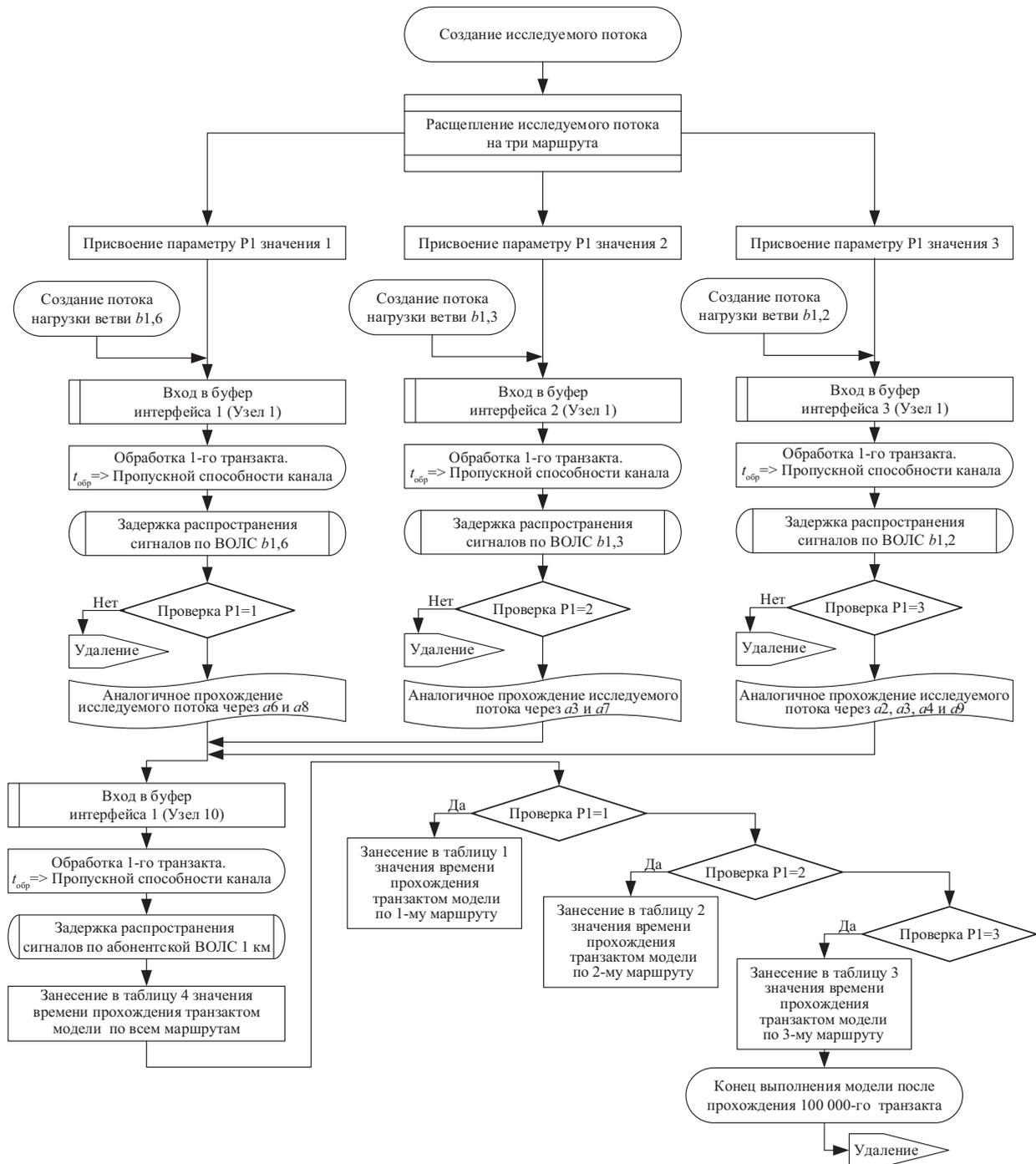


Рис. 2. Алгоритм работы модели, разработанный для языка GPSS Word

сети, при этом средняя задержка составила 757,742, а ее дисперсия 69,341 единиц модельного времени. Так как единица модельного времени равна  $10^{-6}$  реальной секунды, то можно утверждать, что по заданной потоковой структуре по первому маршруту пройдет поток с задержкой 0,7 мс и отклонением 0,07 мс. Из гистограммы на рис. 4 видно, что задержка растет пропорционально времени моделирования. Для гистограммы на рис. 5 можно отметить задержку в 1,1 мс и дисперсию в 0,1 мс. При этом можно сравнить данные результаты с результатами, полученными для

первого маршрута. Величина задержки третьего маршрута больше, что объясняется его большей длиной. Увеличение же дисперсии связано с наличием дополнительного узла обработки информации, а также с большей очередью в буфере интерфейсов маршрута.

### Заключение

Результаты моделирования не противоречат известным закономерностям распределения потоков в транспортной сети связи. Модель

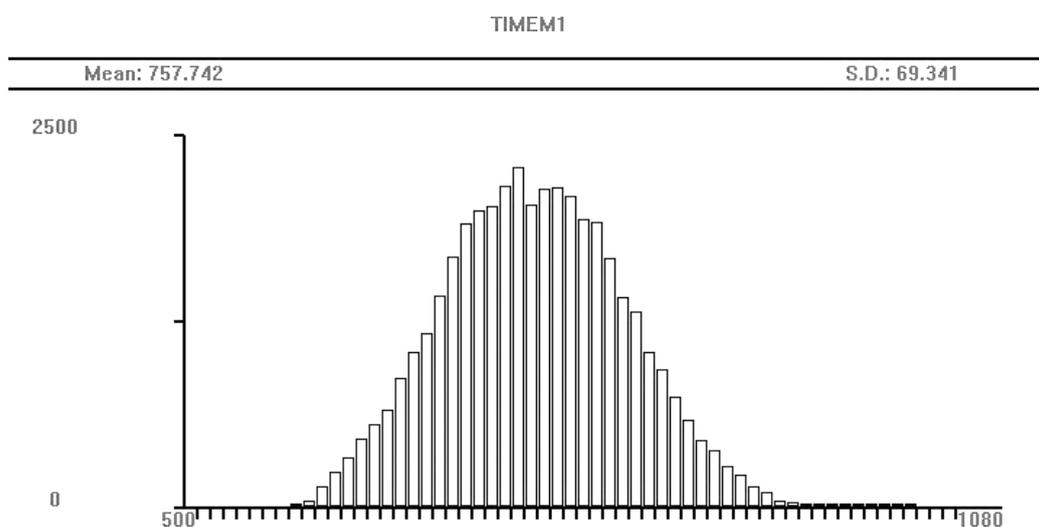


Рис. 3. Распределение времени прохождения пакетов исследуемого потока по первому маршруту модели

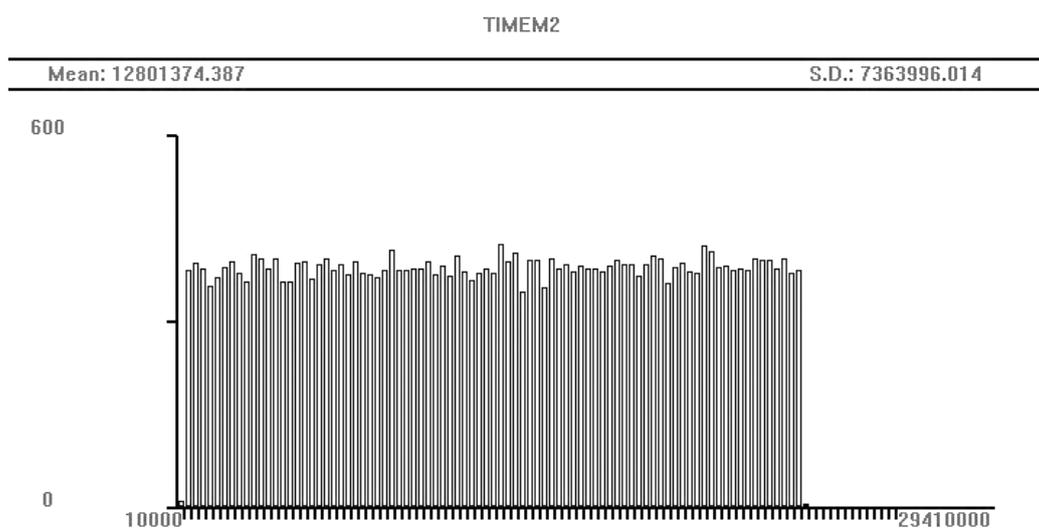


Рис. 4. Распределение времени прохождения пакетов исследуемого потока по второму маршруту модели

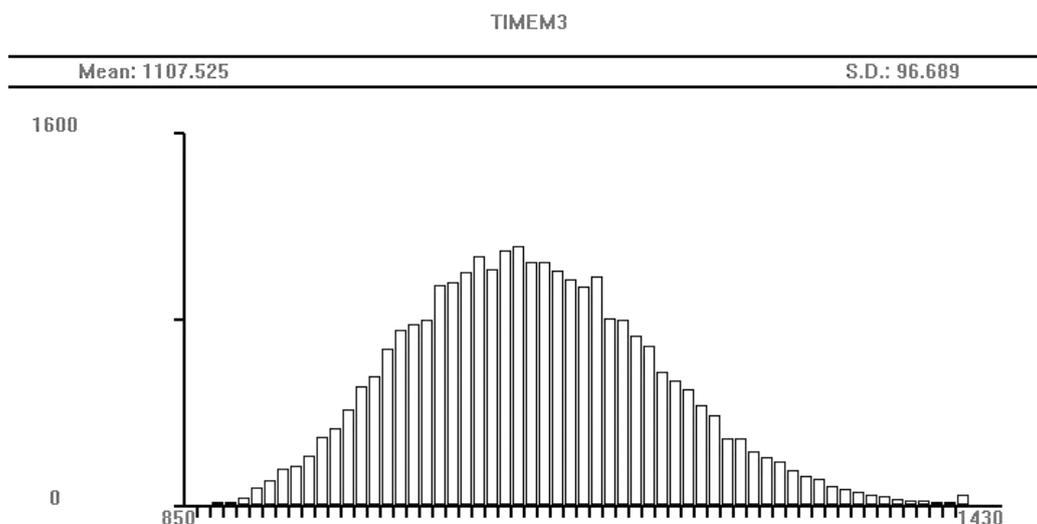


Рис. 5. Распределение времени прохождения пакетов исследуемого потока по третьему маршруту модели

также показала чувствительность к основным факторам, влияющим на распределение потоков в сети, таким как длина пути маршрута, суммарная нагрузка на узлах, соотношение нагрузка – пропускная способность интерфейса и другие. Модель продемонстрировала масштабируемость с точки зрения как размеров сети, так и количества и видов генераторов нагрузки. Кроме этого, среда GPSS Word обладает дискретно-событийным системным ходом времени, поэтому увеличение масштабов сети до масштабов реальных сетей не приведет к росту реального времени моделирования на ЭВМ, так как оно зависит только от количества генерируемых пакетов в модели.

Имитационные модели транспортных сетей связи можно использовать в качестве методики оптимизации плана распределения потоков, где на каждой итерации определяются участки сети, вызывающие деградацию качества сервисов, предоставляемых клиентам, что дает новые исходные данные для последующих изменений в рассматриваемой сети.

Подводя итог, следует отметить, что имитационная модель позволяет воспроизвести весь процесс функционирования любой системы с сохранением логической структуры, связи между явлениями и последовательность их протекания во времени, учесть большое

количество реальных деталей функционирования моделируемого объекта. Имитационная модель незаменима на стадиях проектирования и модернизации систем.

### Библиографический список

1. Аглазинов Э.К. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Э.К. Аглазинов, А.А. Сирота. – М. : Диалог-МИФИ, 2009. – 412 с.
2. Алиев Т.И. Моделирование и анализ подуровня агрегирования мультисервисной телекоммуникационной сети / Т.И. Алиев, И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев // Техника связи. – 2009. – № 2. – С. 12–18.
3. Березко М.П. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных / М.П. Березко, В.М. Вишневецкий, Е.В. Левнер, Е.В. Федоров // Информационные процессы. – 2001. – Т. 1, № 2. – С. 103–125.
4. Лемешко А.В. Разработка и исследование потоковой модели адаптивной маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях с балансировкой нагрузки / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 3 (29). – С. 100–108.
5. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учеб. для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2010. – 944 с.