

## **Лабораторные работы AnyLogic**

Парамонов А.И.

## **Содержание**

1. Имитационное моделирование случайных потоков
2. Исследование свойств агрегированного потока
3. Исследование системы массового обслуживания с отказами
4. Исследование модели системы массового обслуживания с ожиданием
5. Исследование модели системы массового обслуживания с комбинированной дисциплиной обслуживания
6. Исследование модели системы массового обслуживания с приоритетным обслуживанием
7. Имитационное моделирование канала передачи данных с ошибками
8. Имитационное моделирование канала передачи данных с коллизиями
9. Имитационное моделирование множественного доступа с механизмом предотвращения коллизий
10. Моделирование трафика VoIP

## Лабораторная работа №1

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОТОКОВ

#### 1. Моделирование простейшего потока

2.1 Построить структуру модели для изучения свойств потока. В этом случае, мы рассматриваем только источник заявок, систему обслуживания мы можем не использовать вовсе. Однако, для исследования свойств потока будет удобно иметь один или несколько элементов на которые поступает исследуемый поток. Поэтому, построим исходную модель в виде знакомой ранее структуры, содержащей источник (source) заявок, очередь (queue), элемент задержки (delay) и sink (рисунок 1), дополнительно модель содержит: два параметра ( $a$  и  $b$ ), два элемента «событие» (event), две переменные (cnt) и (tm), элемент «данные гистограммы» (iaTime), гистограмму и временной график.

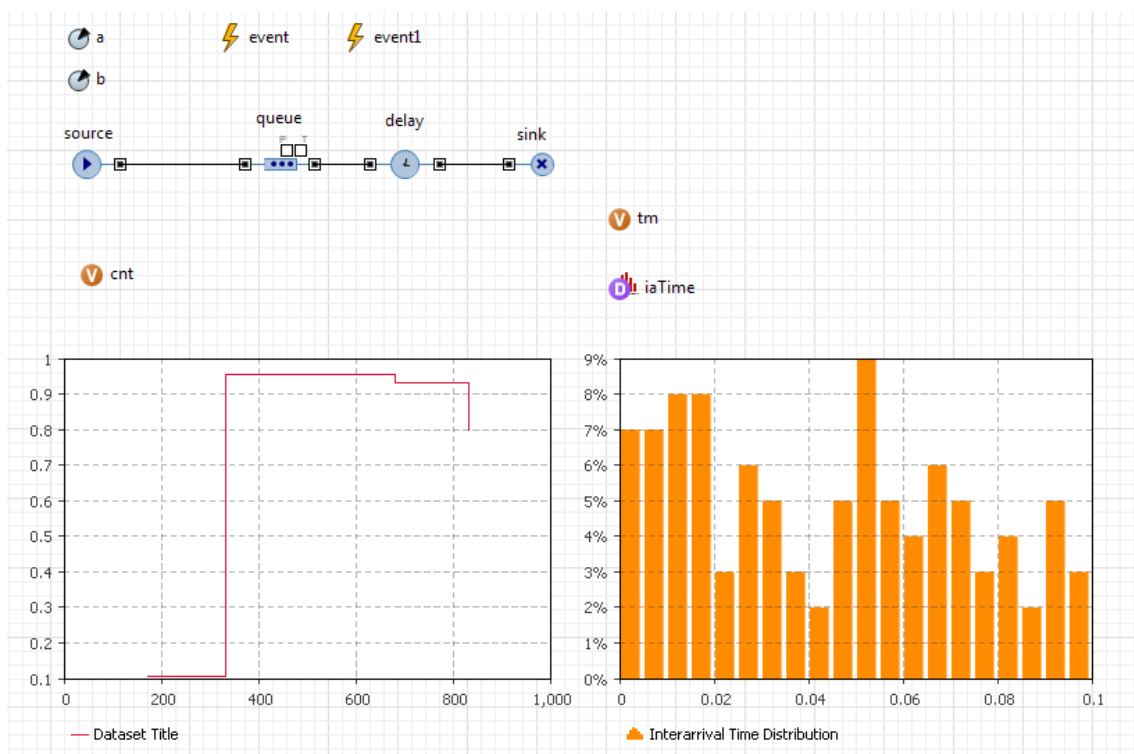


Рисунок 1 – Структура модели

На гистограмме будем отображать гистограмму времени между заявками потока, а на временном графике количество заявок, поступающих за единицу интервал времени.

## 2.2 Определить свойства элементов модели

Свойства

**source - Source**

Имя: source  Отображать имя

Тип заявки: Agent

Прибывают согласно:  Времени между прибытиями

Время между прибытиями:  exponential( a )

За 1 раз создается несколько заявок:

Ограниченное кол-во прибытий:

Новая заявка:  Agent (чтобы создать другой тип, добавьте ег

Местоположение прибытия:  Не задано

**Специфические**

Установить время начала:

Добавить заявки в:   Популяцию по умолчанию  Другую популяцию агентов

Выталкивать заявки:

**Действия**

До прибытия:

При подходе к выходу:

При выходе:  iaTime.add(time()-tm);  
tm=time();

Рисунок 2 – Свойства элемента source

Свойства

**queue - Queue**

Имя: queue  Отображать имя

Тип заявки: Agent

Максимальная вместимость:

Место заявок:

Рисунок 3 – Свойства элемента queue

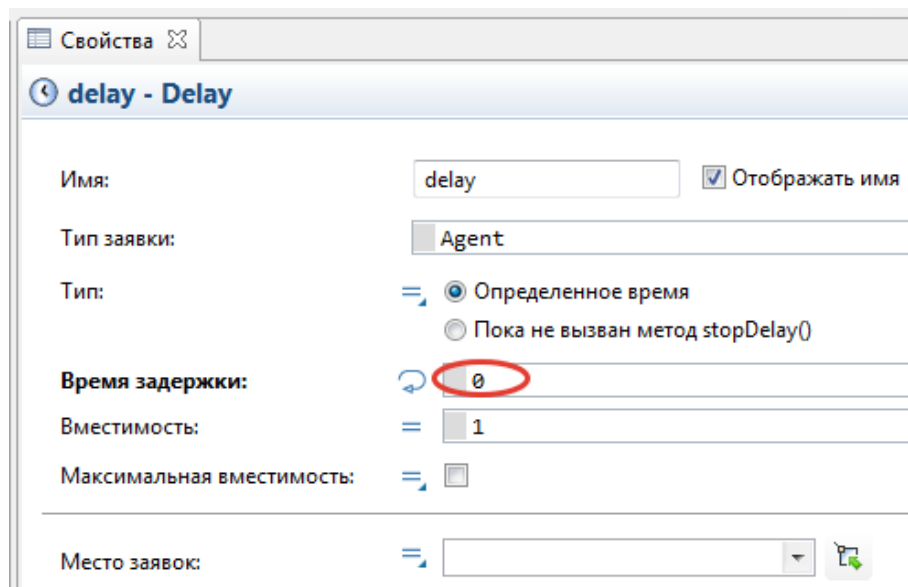


Рисунок 4 – Свойства элемента delay

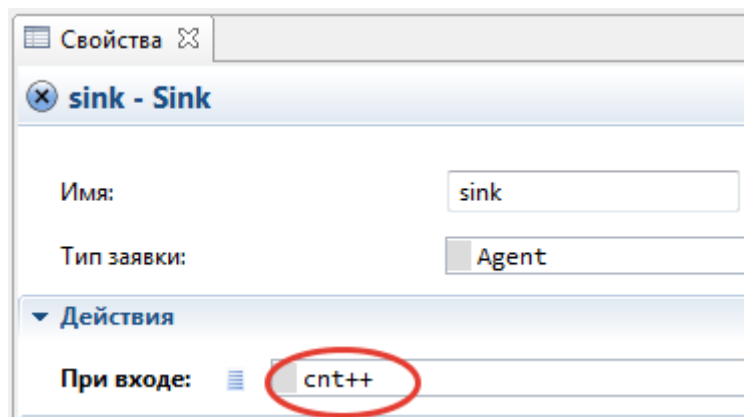


Рисунок 5 – Свойства элемента sink

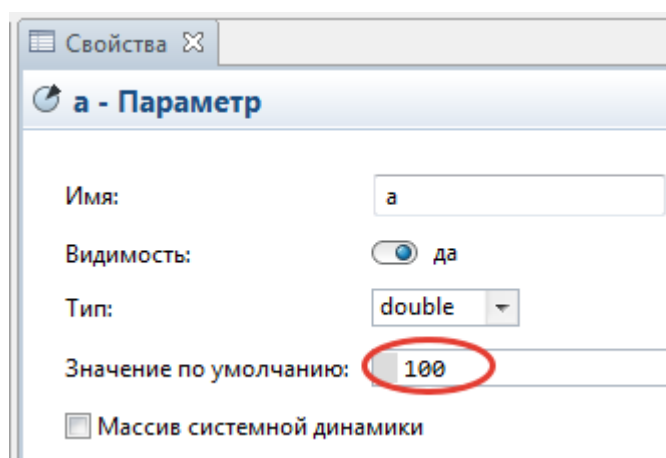


Рисунок 6 – Свойства параметра a

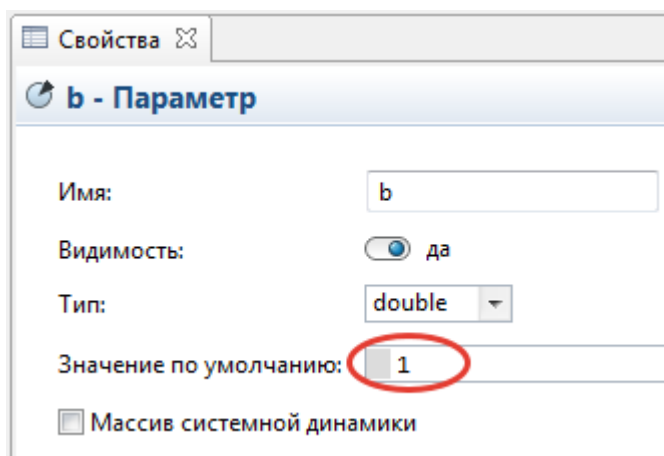


Рисунок 7 – Свойства параметра b

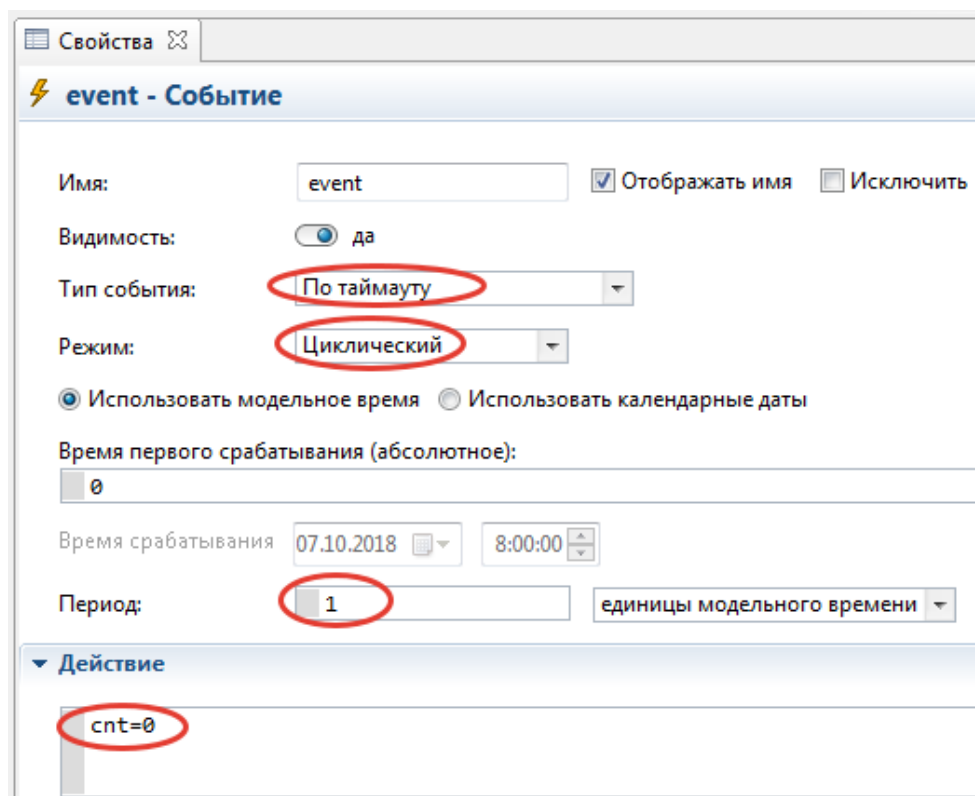


Рисунок 8 – Свойства элемента event

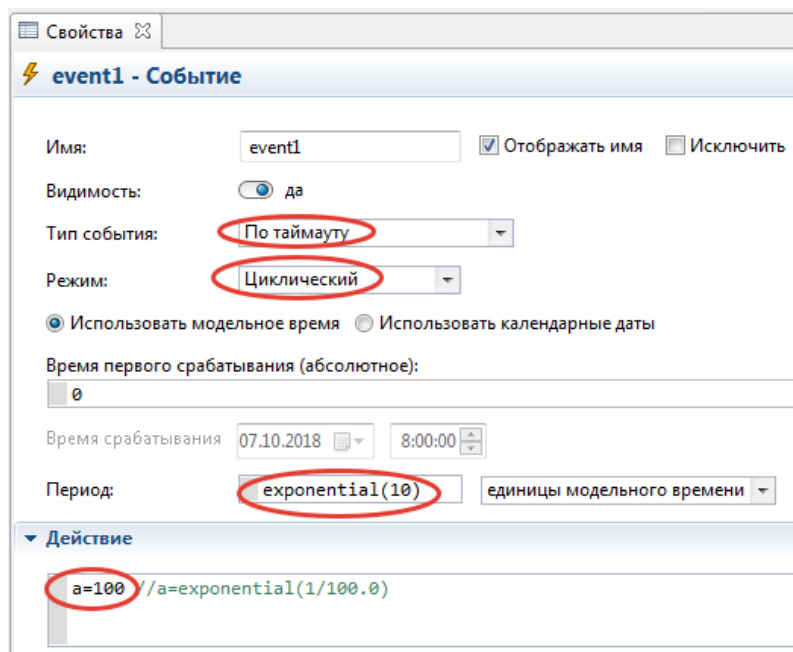


Рисунок 9 – Свойства элемента event1

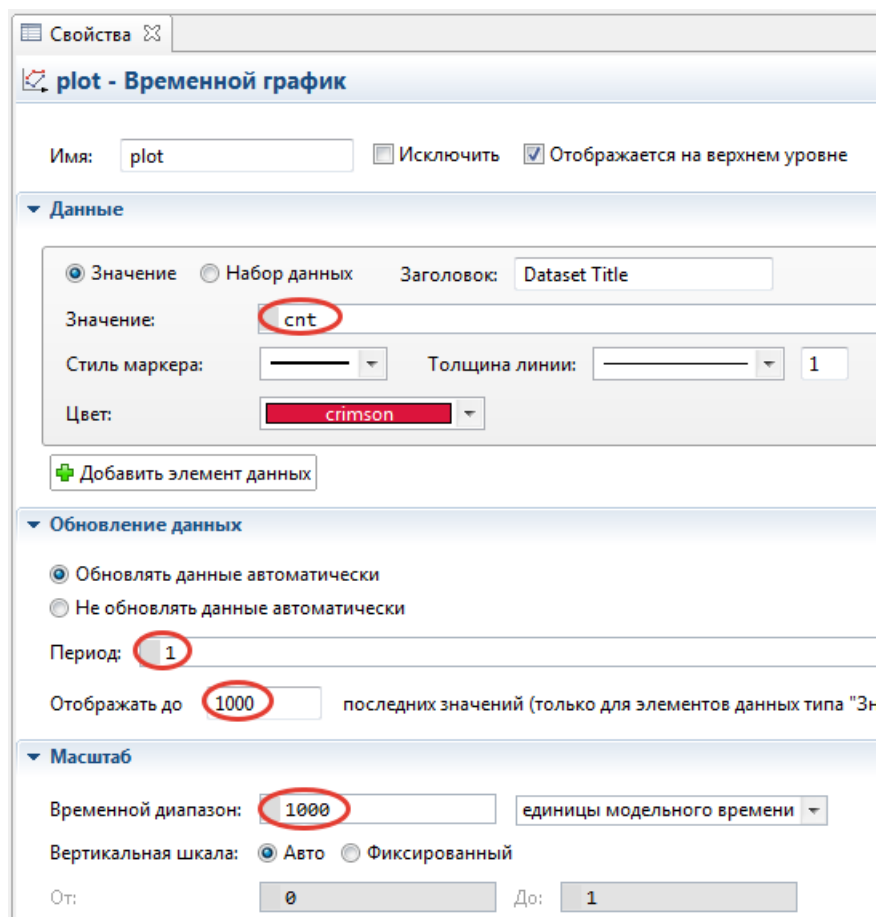


Рисунок 10 – Свойства элемента plot

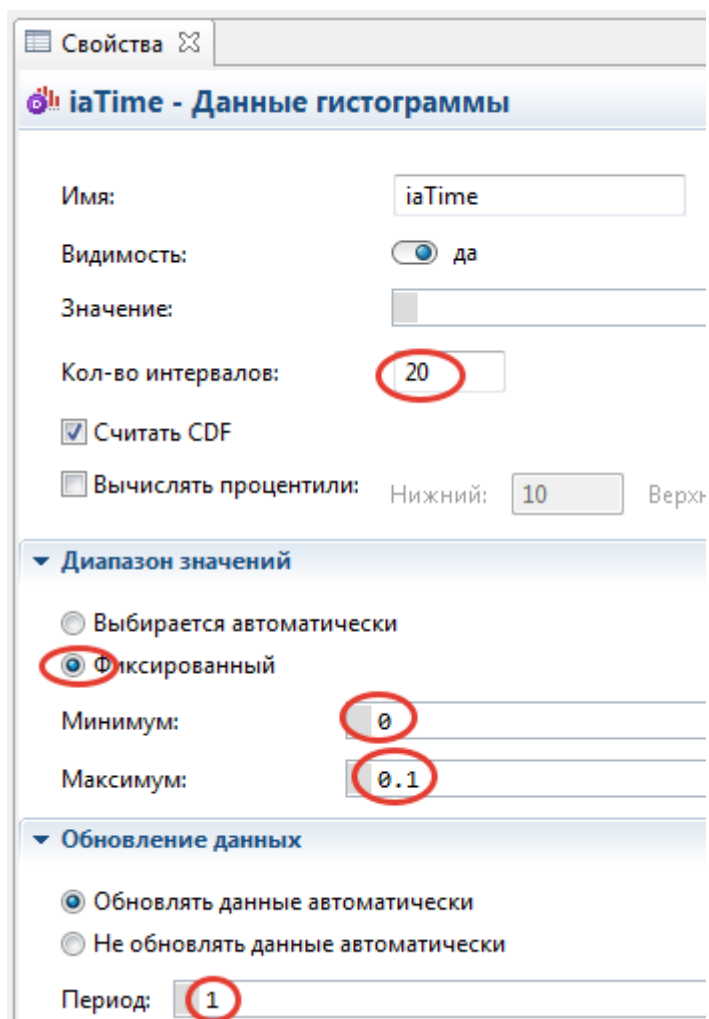


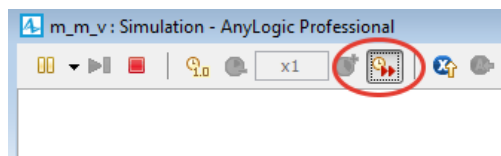
Рисунок 10 – Свойства элемента «данные гистограммы»

## 2.3 Валидация модели

### 2.3.1 Проверка функционирования

Произвести компиляцию и запуск имитационной модели (время остановки не задано), значение интенсивности нагрузки выбрать  $a=1$ .

После успешной компиляции и запуска выбрать максимальную скорость работы модели



После нескольких секунд работы модели на максимальной скорости среднее значение интервала между заявками составит приблизительно 1 ед. времени, а гистограмма времени между заявками должна быть, визуально,



близка к экспоненциальному закону. Значение среднеквадратического отклонения должно быть равно среднему значению (рисунок 6).



Рисунок 11 –Проверка работы модели

Если при компиляции обнаружены ошибки, проверить структуру модели и значения свойств ее параметров, внести исправления и повторить попытку компиляции и запуска.

## 2. Моделирование нестационарного потока

### 2.1 Периодическое изменение интенсивности

Нестационарный поток - это поток в котором вероятность поступления некоторого количества заявок за фиксированный интервал времени зависит от выбора точки начала этого интервала на оси времени. В качестве простейшего примера нестационарного потока построим модель потока, в котором интенсивность заявок является периодической функцией времени. В качестве периодической функции возьмем  $\sin(t)$ , определим интенсивность потока как

$$a + \frac{a}{2} \sin\left(\frac{t}{50}\right)$$



Рисунок 12 –Нестационарный поток

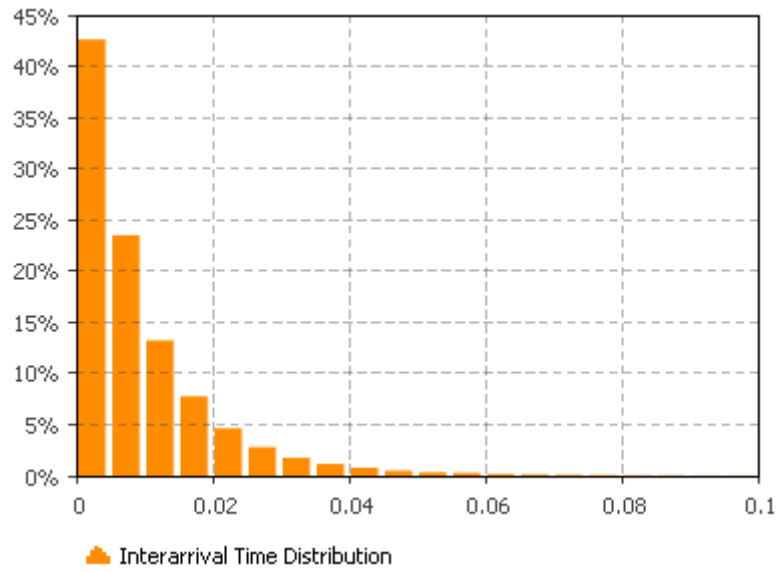


Рисунок 13 –Гистограмма времени между заявками

Коэффициент вариации

$$C_v = 1,00$$

## 2.2 Марковский модулированный пуассоновский поток (ММРП)

Марковский модулированный пуассоновский поток – поток изменение интенсивности которого представляет собой марковский процесс. Будем изменять интенсивность на случайную величину через случайные интервалы времени в качестве распределений выберем экспоненциальные распределения.

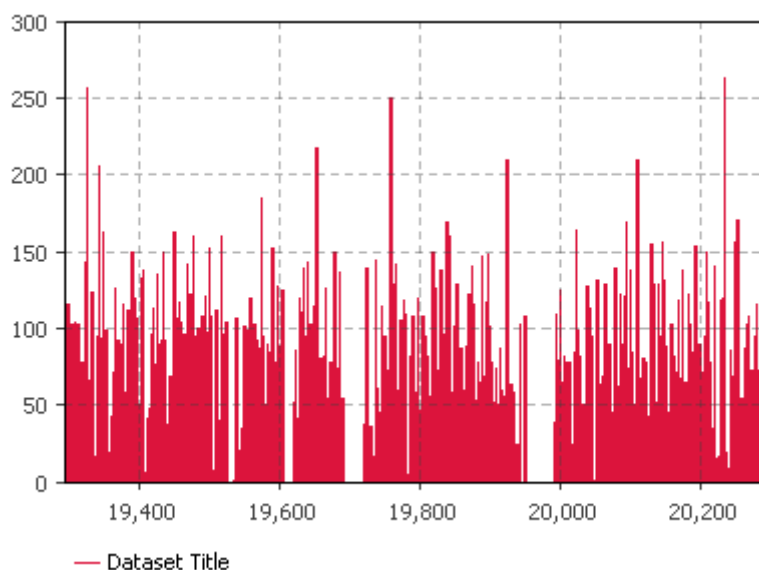


Рисунок 14 - ММРП

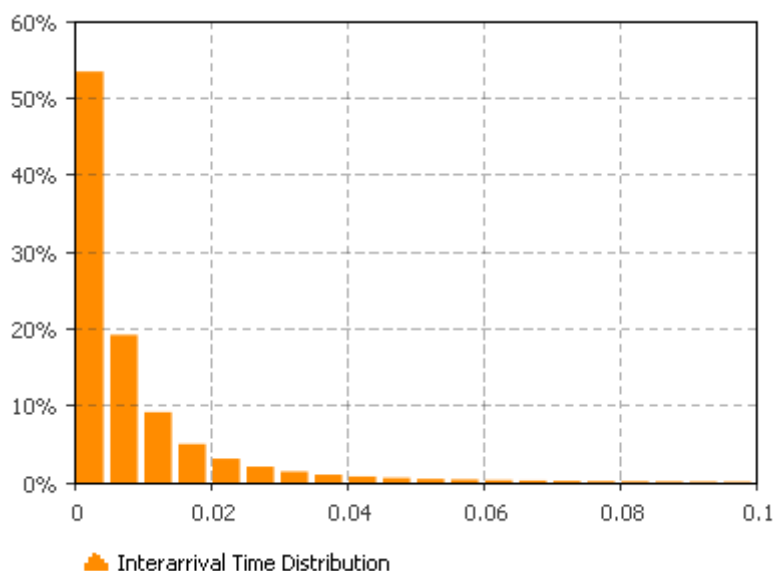


Рисунок 13 –Гистограмма времени между заявками

Коэффициент вариации

$$C_v = 0,94/0,02 = 47$$

### 3. Моделирование неординарного потока

Неординарный поток – поток в котором вероятность поступления двух или более заявок за короткий (стремящийся к нулю) интервал времени больше нуля.

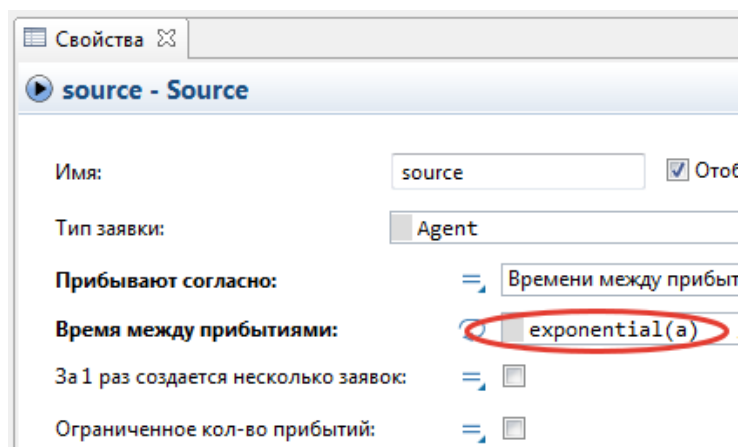


Рисунок 14 – Свойства элемента «source»

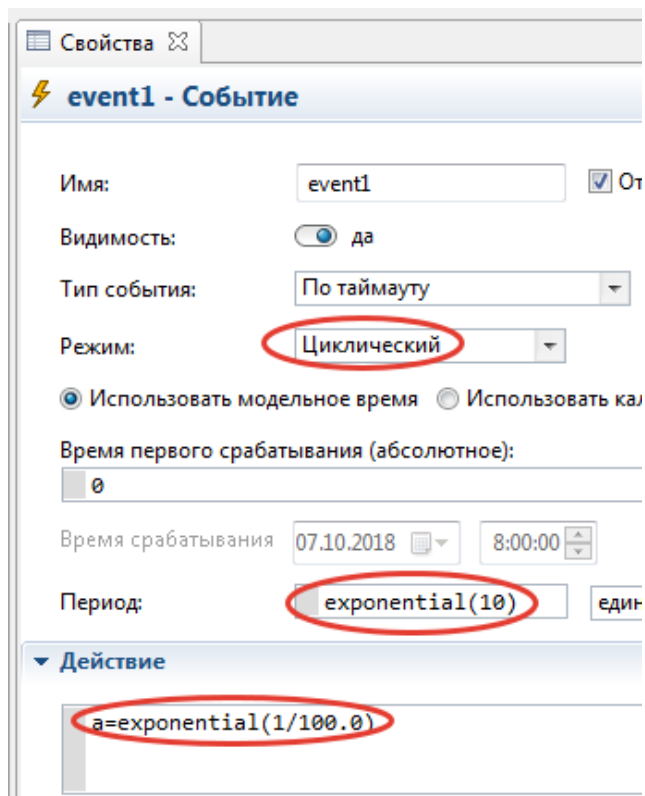


Рисунок 15 – Свойства элемента «event1»



Рисунок 16 – Неординарный поток

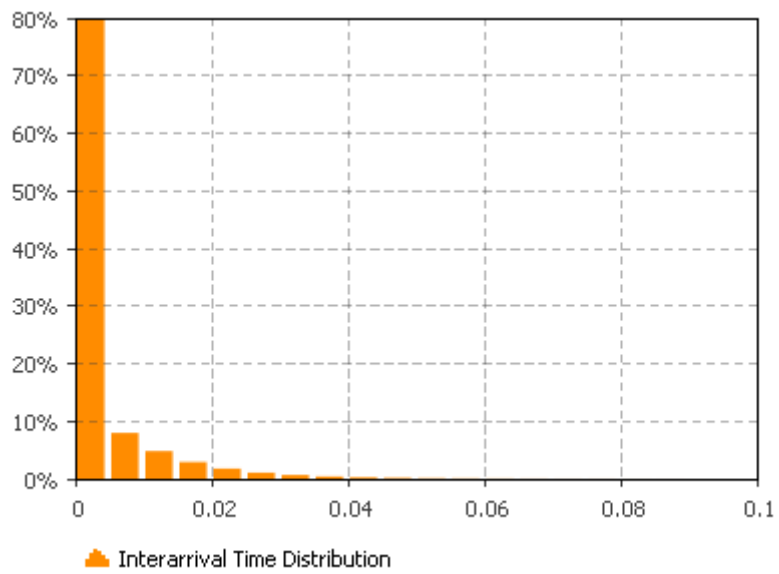


Рисунок 17 – Гистограмма времени между заявками

$$C_v = 0,007 / 0,003 = 2,333$$

#### 4. Моделирование потока с последствием

Поток с последствием – поток в котором вероятность поступления в настоящем, зависит от процесса в прошлом. В качестве примера рассмотрим моделирование потока Эрланга  $k$ -го порядка.

Модифицируем модель, как показано на рисунке 18.

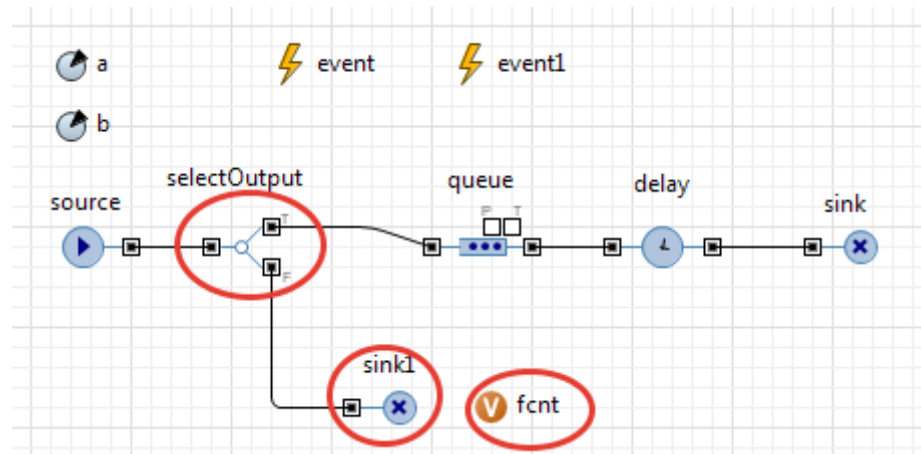


Рисунок 18 – Структура модели

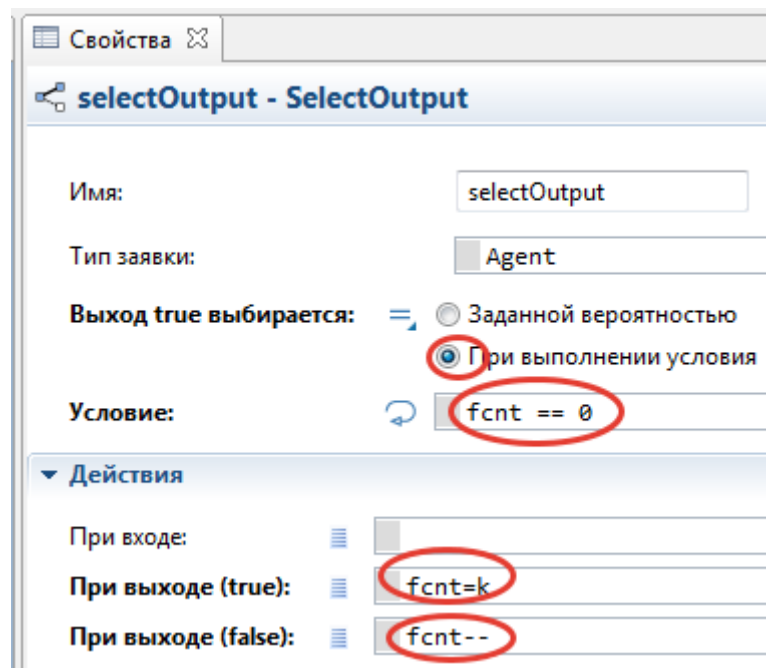


Рисунок 18 – Свойства элемента SelectOutput

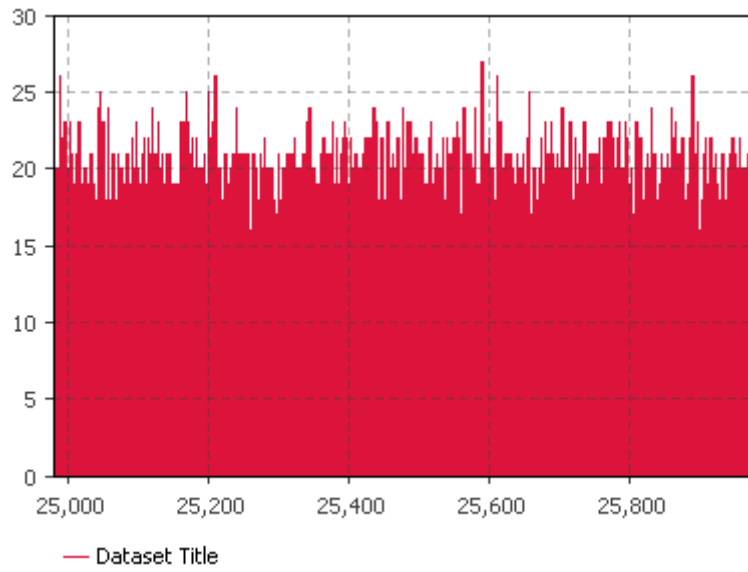


Рисунок 19 – Поток Эрланга 5-го порядка

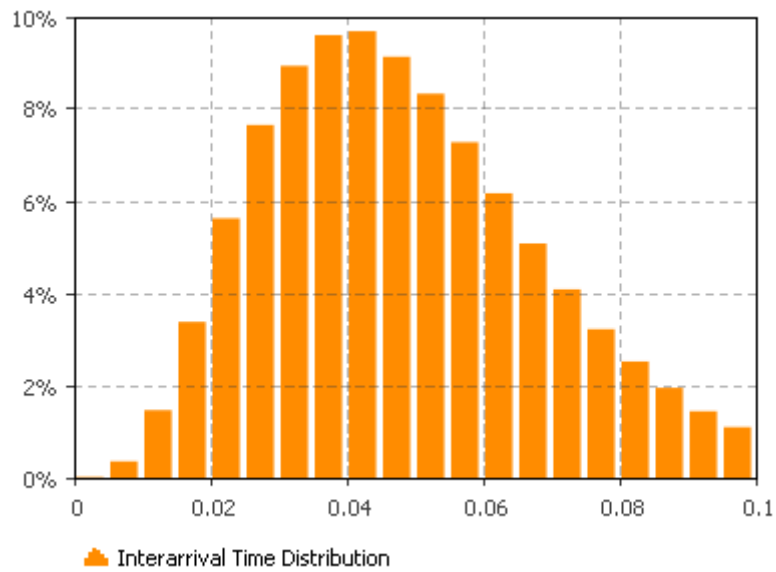


Рисунок 20 – Гистограмма времени между заявками

$$C_v = 0,002 / 0,005 = 0,4$$

## 5. Модель on/off (моделирование пачечного потока)

Примером потока, для имитации которого может быть использована модель on/off может быть поток пакетов, производимый абонентом VoIP телефонии. Фактически он является модулированным потоком, в котором модулирующий процесс является двоичной последовательностью.

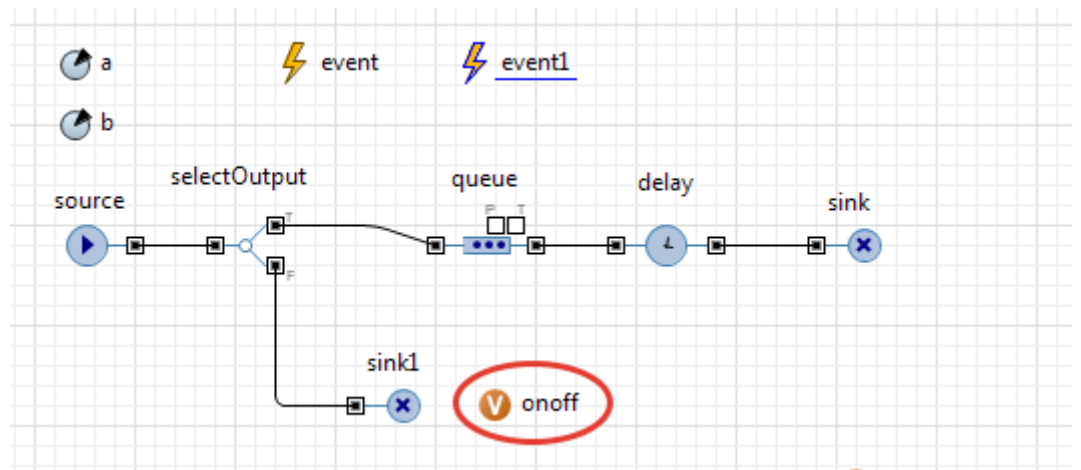


Рисунок 21 – Структура модели

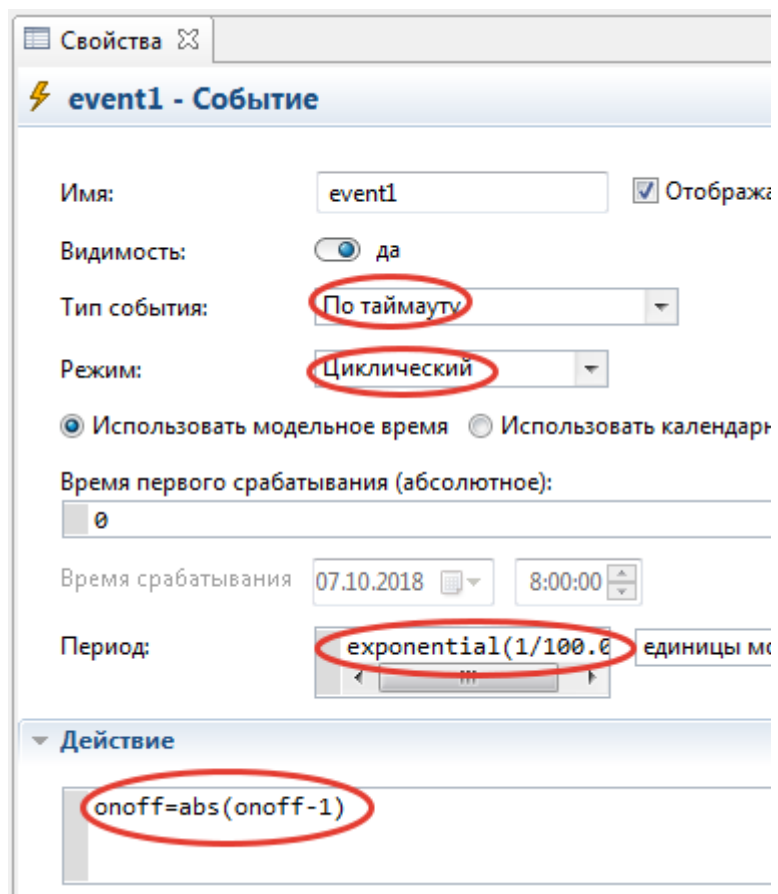


Рисунок 22 – Свойства элемента «event1»



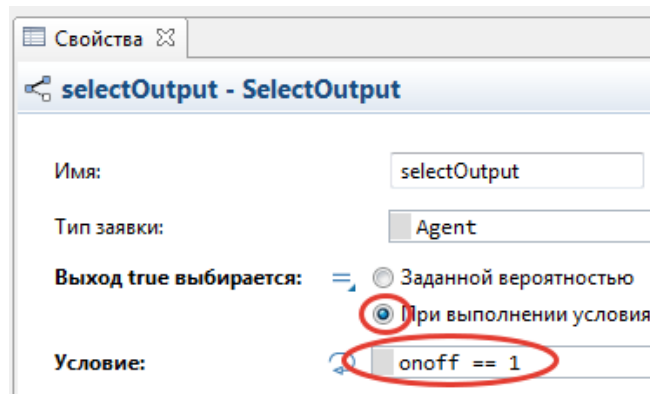


Рисунок 23 – Свойства элемента SelectOutput

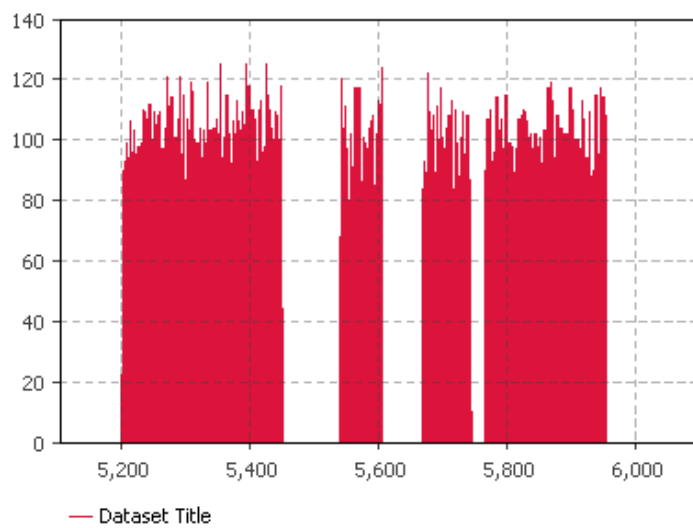


Рисунок 24 – Поток on-off модели

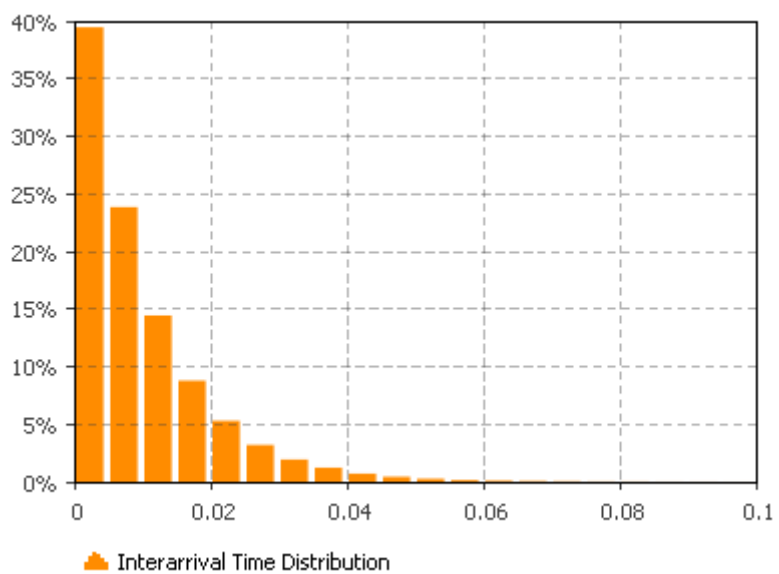


Рисунок 25 – Гистограмма времени между заявками

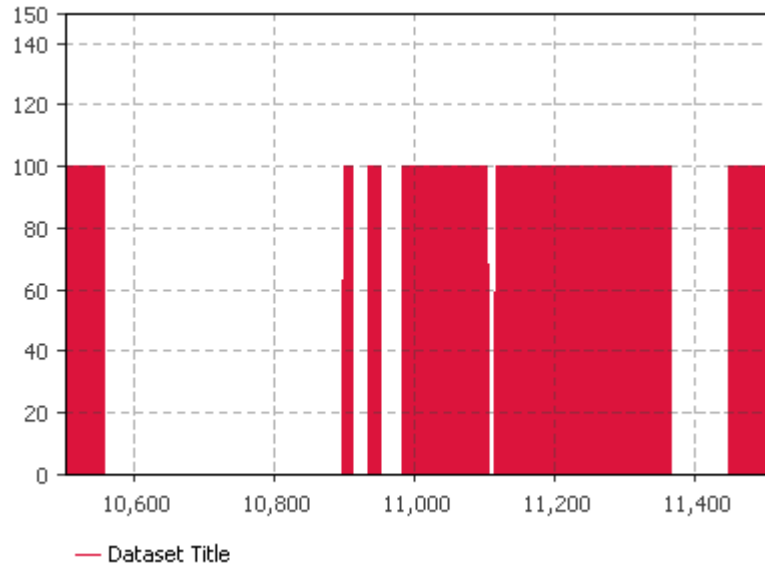


Рисунок 26 – Поток on-off модели (регулярный поток)

### Содержание отчета

1. Результаты моделирования простейшего потока
2. Результаты моделирования нестационарного потока  
-периодическое изменение интенсивности;  
-ММРР;
3. Результаты моделирования неординарного потока;
4. Результаты моделирования потока с последствием  
Поток Эрланга
5. Результаты применения on/off модели

По всем результатам привести реализации потока, гистограммы интервалов времени между заявками, среднее значение, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации интервалов времени между заявками.

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АГРЕГИРОВАННОГО ПОТОКА

#### 1. Имитационное моделирование случайного потока

Из теории массового обслуживания и теории телетрафика известны аналитические модели случайных потоков, которые описывают свойствами стационарности ординарности и последействия. Принято также считать, что потоки могут быть «пачечными», что описывают фрактальными процессами и характеризуют коэффициентом Херста и называют самоподобными. Также их описывают автокорреляционной функцией потока, которая при наличии свойств самоподобия убывает медленнее, чем при их отсутствии (потоки с медленно убывающей зависимостью – МУЗ LRD).

Цель данной работы состоит в изучении методов моделирования случайных потоков и свойств агрегированного потока, полученного объединением группы различных потоков.

План работы:

1. Построить имитационную модель для изучения свойств случайных потоков, выполнить ее валидацию.
2. Получить и сопоставить результаты имитационного и аналитического моделирования на примере простейшего потока.
3. Модифицировать имитационную модель в модель с агрегированием потоков и исследовать ее функционирование.
4. Сформулировать полученные результаты и сделать выводы.

#### 2. Построение имитационной модели

##### 2.1 Построить структуру модели для изучения свойств потока

В этом случае, мы рассматриваем только источник заявок, систему обслуживания мы можем не использовать вовсе. Однако, для исследования свойств потока будет удобно иметь один или несколько элементов на которые поступает исследуемый поток. Поэтому, построим исходную модель в виде знакомой ранее структуры, содержащей источник (source) заявок, очередь (queue) и sink (рисунок 1). Включим также в модель элементы: переменная и данные гистограммы.

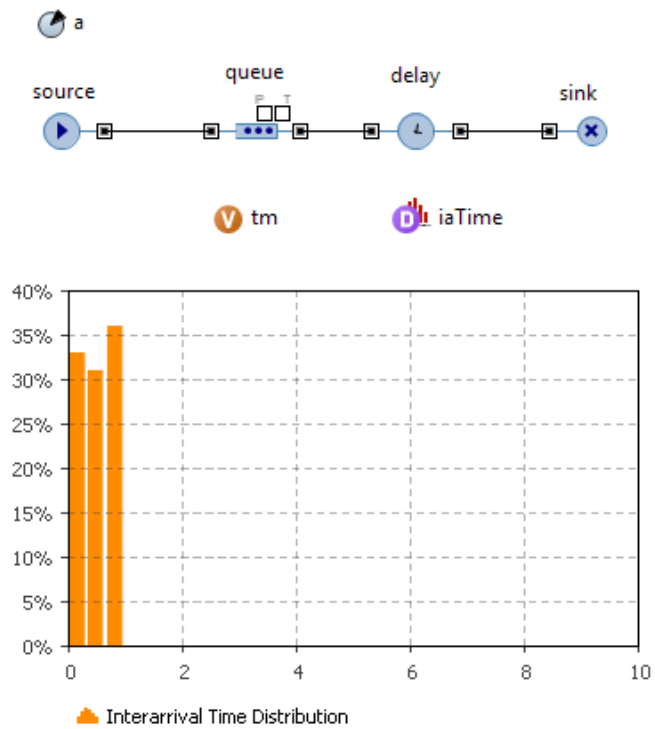


Рисунок 1 – Структура модели

## 2.2 Определить свойства элементов модели

Свойства ✕

**source - Source**

Имя:   Отображать имя

Тип заявки:

Прибывают согласно:

Время между прибытиями:

За 1 раз создается несколько заявок:

Ограниченное кол-во прибытий:

Новая заявка:  (чтобы создать другой тип, добавьте ег

Местоположение прибытия:

**Специфические**

Установить время начала:

Добавить заявки в:  Популяцию по умолчанию  Другую популяцию агентов

Выталкивать заявки:

**Действия**

До прибытия:

При подходе к выходу:

При выходе:

Рисунок 2 – Свойства элемента source

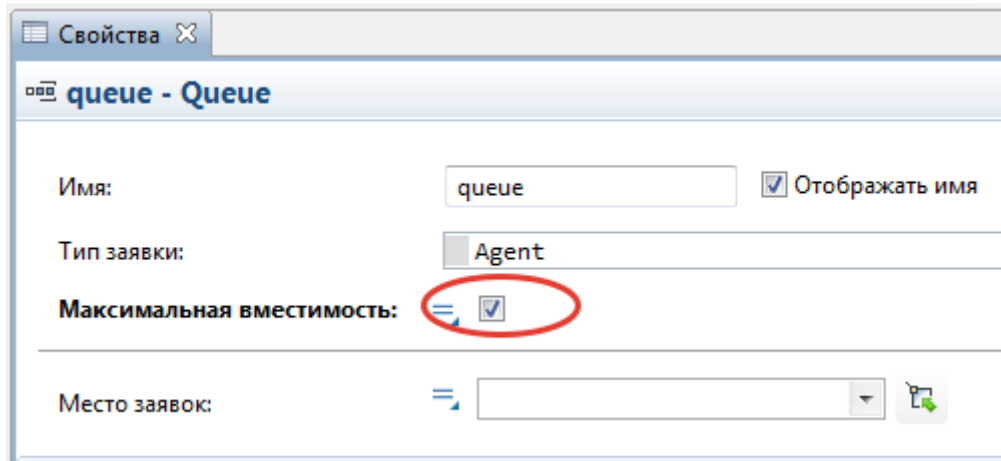


Рисунок 3 – Свойства элемента queue

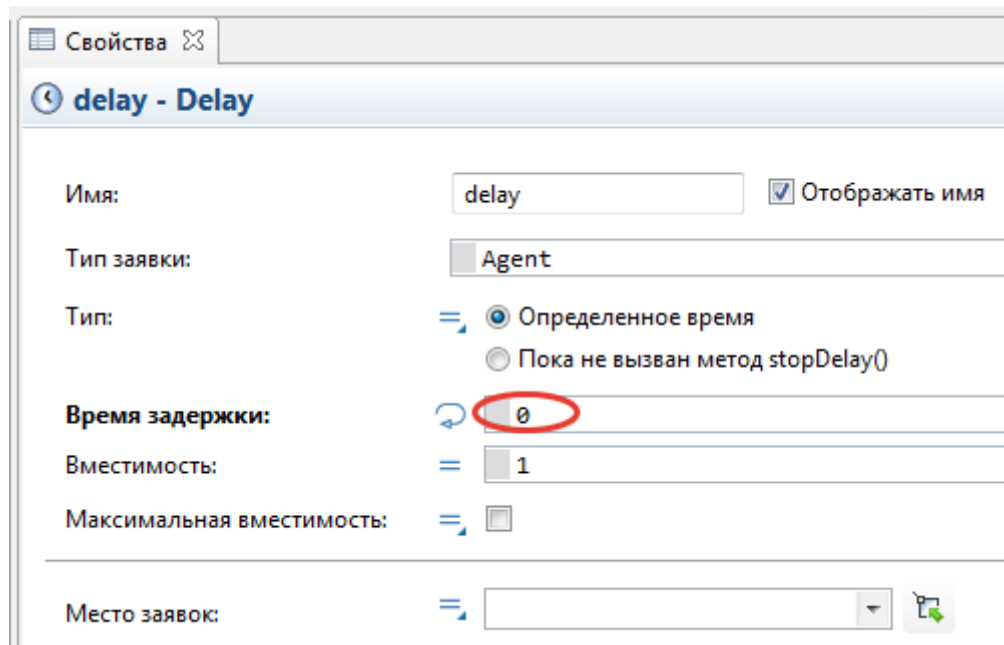


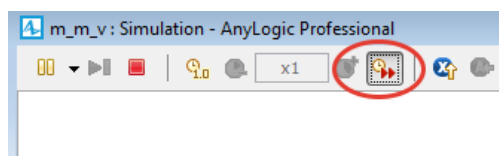
Рисунок 4 – Свойства элемента delay

## 2.3 Валидация модели

### 2.3.1 Проверка функционирования

Произвести компиляцию и запуск имитационной модели (время остановки не задано), значение интенсивности нагрузки выбрать  $a=1$ .

После успешной компиляции и запуска выбрать максимальную скорость работы модели



После нескольких секунд работы модели на максимальной скорости среднее значение интервала между заявками составит приблизительно 1 ед. времени, а гистограмма времени между заявками должна быть, визуально, близка к экспоненциальному закону. Значение среднеквадратического отклонения должно быть равно среднему значению (рисунок 6).

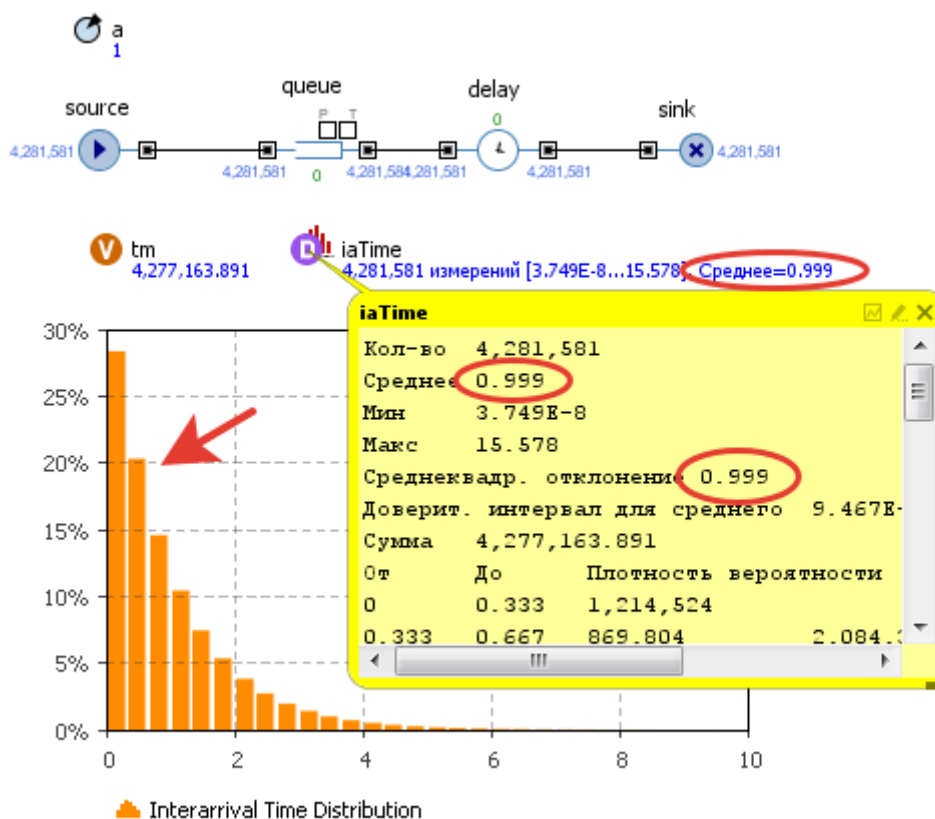


Рисунок 6 –Проверка работы модели

Если при компиляции обнаружены ошибки, проверить структуру модели и значения свойств ее параметров, внести исправления и повторить попытку компиляции и запуска.

### 2.3.2 Сравнение результатов с аналитической моделью

Выполнить прогон имитационной модели. Полученные значения занести в таблицу 1. В таблицу заносятся данные гистограммы, а именно значения количества попаданий  $n_i$  в соответствующие временные интервалы. Значения теоретической вероятности попадания в интервалы рассчитываются на основе известной функции экспоненциального распределения

$$F(t) = p(T < t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

Где параметр  $\lambda=1$ .

$$p_i = F(t_i^{(H)}) - F(t_i^{(L)}) = -e^{-\lambda t_i^{(H)}} + e^{-\lambda t_i^{(L)}}$$

где  $F(t_i^{(H)})$ ,  $F(t_i^{(L)})$  значения функции распределения на верхней и нижней границах интервала, соответственно.

Таблица – 1 Сравнение эмпирического и теоретического распределений с помощью критерия Пирсона

N	Интервал значений		$n_i$	$p_i$	$(n_i - np_i)^2 / np_i$
	L	H			
1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,33			
2	0,33	0,67			
3	0,67	1,00			
4	1,00	1,33			
5	1,33	1,67			
6	1,67	2,00			
7	2,00	2,33			
8	2,33	2,67			
9	2,67	3,00			
10	3,00	3,33			
11	3,33	3,67			
12	3,67	4,00			
13	4,00	4,33			
14	4,33	4,67			
15	4,67	5,00			
16	5,00	5,33			
17	5,33	5,67			
18	5,67	6,00			
19	6,00	6,33			
20	6,33	6,67			
21	6,67	7,00			
22	7,00	7,33			
23	7,33	7,67			
24	7,67	8,00			
25	8,00	8,33			
26	8,33	8,67			
27	8,67	9,00			
28	9,00	9,33			
29	9,33	9,67			

30	9,67	10,00			
		$n=\Sigma$			$\Sigma$

Сумма по столбцу 6 дает значение статистики Пирсона, которое нужно сравнить с критическим значением. В частности, критическое значение для доверительной вероятности 0,95 и 29 степеней свободы (на единицу меньше числа интервалов в гистограмме), составляет 42,56. Если полученное значение статистики Пирсона превышает критическое, то гипотеза о теоретической модели распределения отвергается с доверительной вероятностью 0,95. В противном случае гипотеза не отвергается. Если построенная модель верна, и получена достаточно показательная статистика, то результат проверки не должен отвергать гипотезу об экспоненциальном распределении. Если все же гипотеза отвергается, то можно попробовать увеличить продолжительность эксперимента или изменить количество интервалов (например, уменьшить до 20). Применение критерия Пирсона предполагает, что в каждый выбранный интервал попадает достаточно большое количество наблюдений (добиться выполнения этого условия не всегда удастся).

### 3 Исследование свойств агрегированного потока

Изменим свойства потока, производимого источником. Например, в качестве распределения интервала времени между заявками выберем равномерное распределение. Тогда в источнике заявок, в поле «время между прибытиями» нужно будет ввести выражение  $2*\text{uniform}()$ . Запустив модель можно убедиться, что гистограмма интервала времени между заявками соответствует равномерному распределению на интервале от 0 до 2, со средним значением 1.

Далее будем последовательно увеличивать количество потоков (источников заявок) в модели, указывая в их свойствах различные законы распределения интервалов между заявками. Рекомендуется выбирать: равномерное, гамма, треугольное, Парето распределения. Каждое из распределений может быть выбрано несколько раз с различными параметрами (желательно, не более 2 раз). После добавления очередного потока (источника) производится вычисление статистики Пирсона, оценка среднего значения и среднеквадратического отклонения интервала между заявками. Результаты оценок заносятся в таблицу 2. В качестве гипотезы выбирается гипотеза об экспоненциальном распределении, т.е. о простейшем потоке заявок. При выборе параметров распределений следует стремиться к



тому, чтобы средние значения случайных величин были равными или близкими, это позволит избежать доминирования свойств одного из потоков. Естественно, что интенсивность агрегированного потока будет больше интенсивности единичных потоков и будет определяться суммой интенсивностей объединяемых потоков.

Таблица – 2 Исследование агрегированного потока

Кол-во потоков	Законы распределения.	$\bar{\tau}$	$\sigma_{\tau}$	$\overline{\chi^2}$	$\chi_0^2$	Гипотеза
1	2	3	4	5	6	7
1	Равномерное	1,000	0,333			Отвергнута
2	Равномерное, гамма					
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Обозначения в таблице:

$\bar{\tau}$  - среднее значение интервала между заявками агрегированного потока,

$\sigma_{\tau}$  - среднеквадратическое отклонение интервала времени между заявками агрегированного потока,

$\overline{\chi^2}$  - значение статистики Пирсона (сумма по столбцу 6);

$\chi_0^2$  - критическое значение для заданных доверительной вероятности и количества степеней свободы.

Критическое значение может быть определено

При проверке гипотезы выбирается доверительная вероятность 0,95 и число степеней свободы  $r=n-1$ , где  $n$ - выбранное количество интервалов в гистограмме.

Критическое значение зависит от выбранной доверительной вероятности и числа степеней свободы, оно может быть определено из таблиц или выбором соответствующей функции в математических программах, например в MS Excel это функция «ХИ2.ОБР».

Естественно, что в случае одного единственного потока, отличающегося от простейшего, гипотеза об экспоненциальном распределении будет отвергнута. При увеличении количества потоков распределение интервала времени между заявками будет приближаться к экспоненциальному распределению. О степени близости свойств объединенного потока к свойствам простейшего потока можно судить визуально по гистограмме, величине статистики Пирсона и по близости оценок для среднего значения и среднеквадратического отклонения, которые в случае экспоненциального распределения должны быть равны между собой.

Количество объединяемых потоков следует увеличивать до тех пор, пока применение критерия Пирсона не отвергнет гипотезу об экспоненциальном распределении, но не более 10 шт. (Может оказаться, что при 10 потоках гипотеза все же отвергается, в этом случае эксперименты следует завершить). Независимо от результата окончания эксперимента следует привести график зависимости статистики Пирсона от количества агрегируемых потоков.

#### **4. Выводы по работе**

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели СМО агрегированного потока.
2. По результатам имитационного моделирования потоков, отличных от простейшего потока.
3. По результатам исследования зависимости свойств агрегированного потока от числа составляющих его потоков.

#### **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и краткое описание проводимых исследований
2. Таблицы с результатами экспериментов
3. Гистограммы, построенные по таблице 1 (п.2.3.3), аналогичную гистограмму, построенную для агрегированного потока при максимальном количестве объединяемых потоков.
4. График зависимости статистики Пирсона от количества объединяемых потоков.
5. Выводы по полученным в работе результатам.

## Лабораторная работа №3

# ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОТКАЗАМИ

### 1. Система массового обслуживания с отказами

Модель системы массового обслуживания (СМО) с отказами в теории сетей связи, как правило, применяется для описания процесса обслуживания вызовов (заявок) в сети с коммутацией каналов. Обычно в теории массового обслуживания события, связанные с требованием на обслуживание называются заявками, например, поступление телефонного вызова или иное событие рассматривается как заявка. При этом канал ассоциируется с обслуживающим устройством, а время его занятия с временем обслуживания. Например, в телефонной сети, занятие канала на время разговора между абонентами ассоциируется с обслуживанием заявки обслуживающим устройством, при этом время обслуживания равно времени разговора.

Система предполагает следующее правило функционирования:

- система обслуживания содержит несколько обслуживающих устройств (одно или более – несколько каналов);
- на вход системы поступает поток заявок (вызовов);
- если в момент поступления заявки имеется свободное устройство, то оно берет заявку на обслуживание (занимается канал);
- если в момент поступления заявки свободных обслуживающих устройств (каналов) нет, то заявка теряется (происходит отказ в обслуживании);
- по истечении времени обслуживания занятое обслуживающее устройство освобождается и снова готово к обслуживанию очередной заявки.

Свойства данной СМО зависят от свойств входящего потока заявок, свойств процесса их обслуживания и количества обслуживающих устройств. Характеристикой данной системы является доля отказов (вероятность потерь или просто потери), которая определяется как доля заявок, получивших отказ в обслуживании.

### 2. Задание на лабораторную работу

#### 2.1 Построить структуру модели СМО в системе AnyLogic

Для построения модели используются библиотечные элементы типов: source, delay, selectOutput, два элемента sink, два параметра, одна переменная.

Элементы соединяются как показано на рисунке 1.

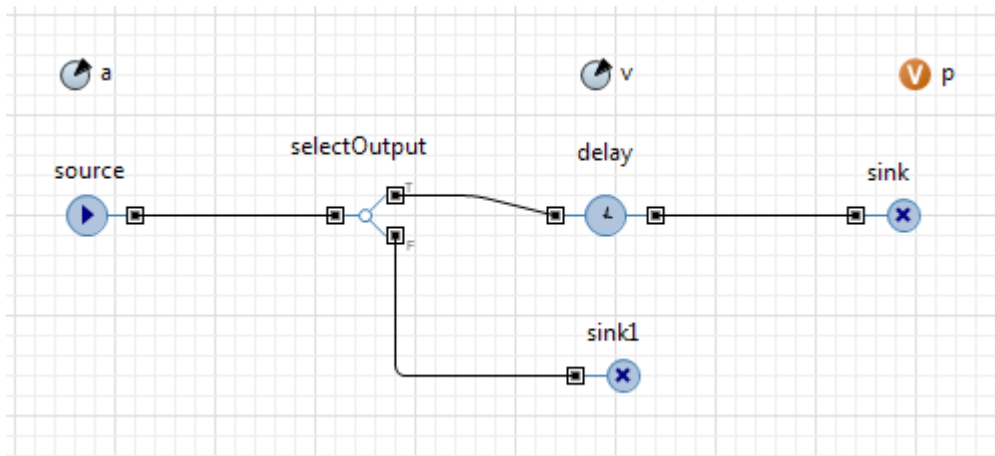


Рисунок 1 – Структура модели СМО

## 2.2 Определить свойства элементов модели

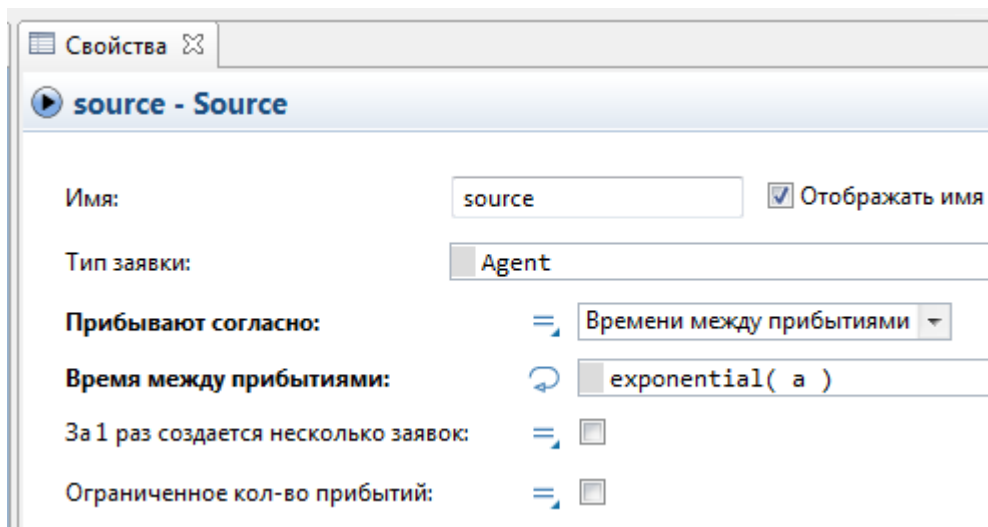


Рисунок 2 – Свойства элемента source

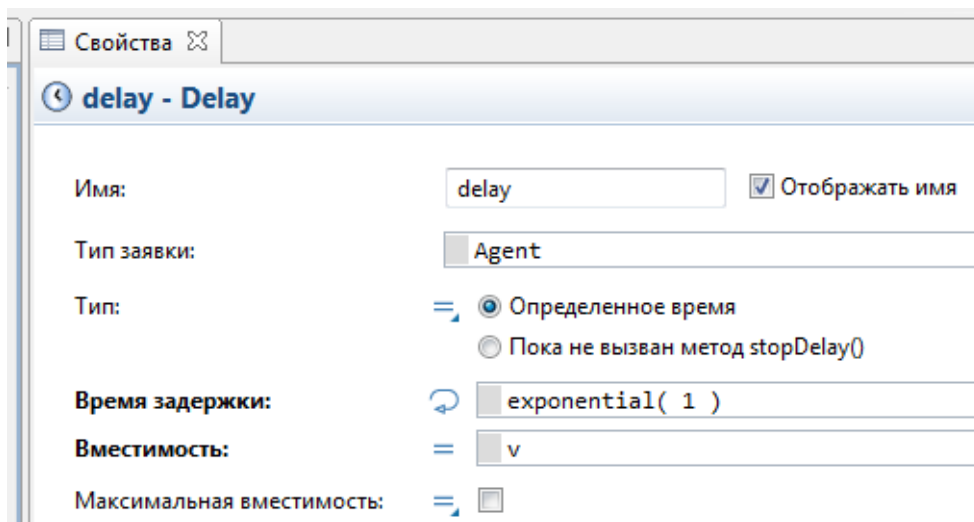


Рисунок 3 – Свойства элемента delay

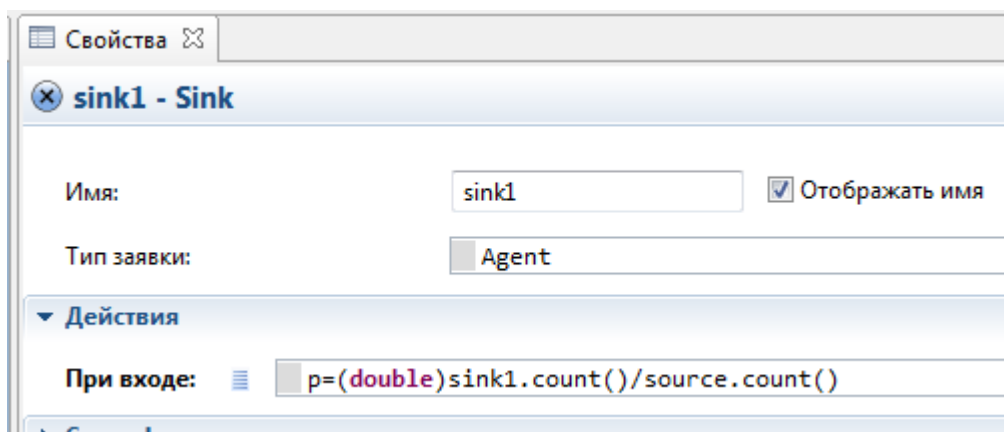


Рисунок 4 – Свойства элемента sink1

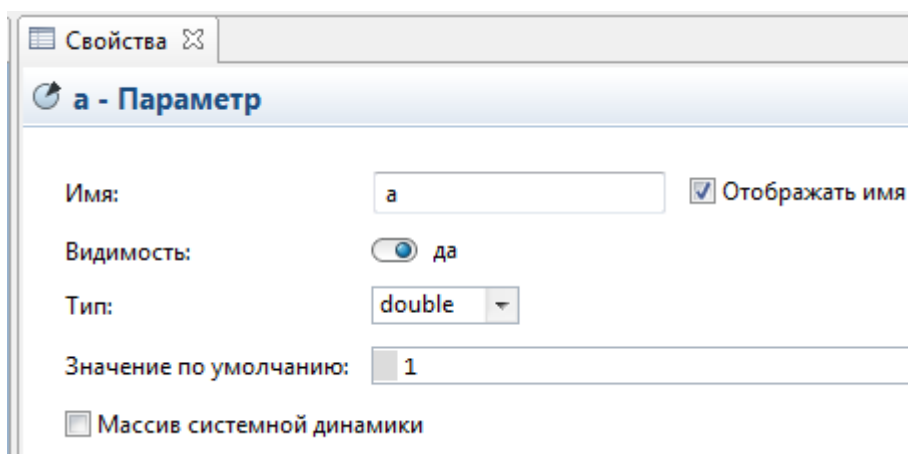


Рисунок 5 – Свойства элемента параметр a

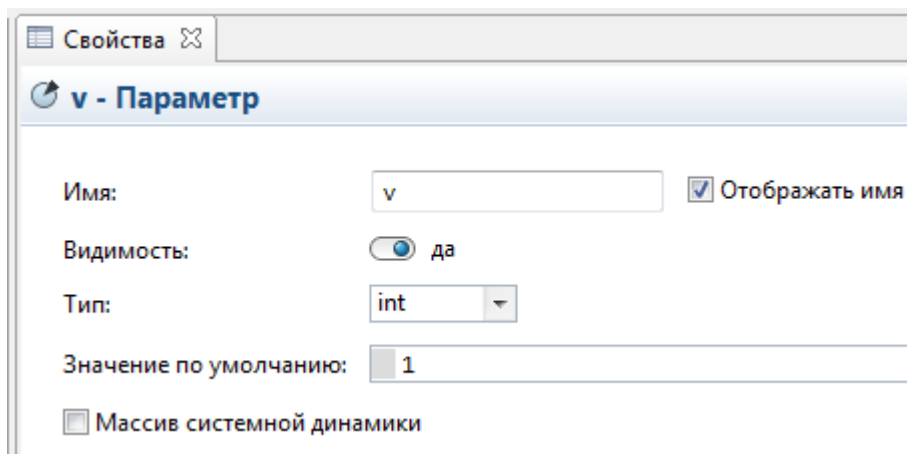
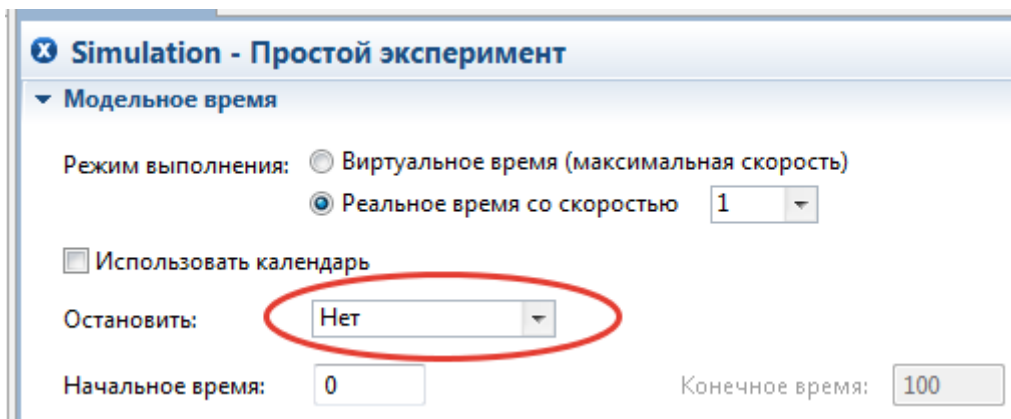


Рисунок 6 – Свойства элемента параметр v

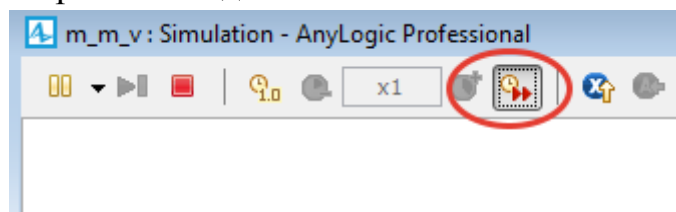
## 2.3 Валидация модели

### 2.3.1 Проверка функционирования

Произвести компиляцию и запуск имитационной модели (время остановки не задано)



После успешной компиляции и запуска выбрать максимальную скорость работы модели



После нескольких секунд работы модели на максимальной скорости значение переменной p должно установиться примерно равным 0,5

 p  
0.5

Если при компиляции обнаружены ошибки, проверить структуру модели и значения свойств ее параметров, внести исправления и повторить попытку компиляции и запуска.

### 2.3.2 Сравнение результатов с аналитической моделью

Выполнить ряд прогонов имитационной модели с разным значением интенсивности нагрузки для различных значений количества обслуживающих устройств  $v$ . Полученные оценки вероятности потерь занести в таблицу 1, округлять числа до 3 знаков после запятой.

Таблица – 1 Оценки вероятности потерь для различных значений интенсивности нагрузки и количества обслуживающих устройств

N	$a_0$	Имитационная модель						Аналитическая модель					
		$v=10$		$v=50$		$v=200$		$v=10$		$v=50$		$v=200$	
		$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$
1	0,1	1		5		20		1		5		20	
2	0,2	2		10		40		2		10		40	
3	0,3	3		15		60		3		15		60	
4	0,4	4		20		80		4		20		80	
5	0,5	5		25		100		5		25		100	
6	0,6	6		30		120		6		30		120	
7	0,7	7		35		140		7		35		140	
8	0,8	8		40		160		8		40		160	
9	0,9	9		45		180		9		45		180	
10	1,0	10		50		200		10		50		200	

По данным таблицы 1 построить график зависимости вероятности потерь от интенсивности нагрузки и количества обслуживающих устройств.

**Примечание.** Аналитическая модель – 1 Формула Эрланга

$$p = \frac{a^v}{v!} \sum_{k=0}^v \frac{a^k}{k!}$$

### 3. Исследование СМО при различных характеристиках входящего потока

Исследовать зависимость вероятности потерь при отличии входящего потока от простейшего. Для этого принять распределение интервалов времени между пакетами как треугольное и как равномерное при среднем значении равным 1 (две серии экспериментов). Выполнить ряд прогонов

имитационной модели с разным значением интенсивности нагрузки для различных значений количества обслуживающих устройств  $\nu$ . Полученные оценки вероятности потерь занести в таблицу 2, округлять числа до 3 знаков после запятой.

Таблица – 2 Оценки вероятности потерь для различных свойств входящего потока

N	$a_0$	Треугольное распределение						Равномерное распределение					
		$\nu=10$		$\nu=50$		$\nu=200$		$\nu=10$		$\nu=50$		$\nu=200$	
		$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$	$a$	$p$
1	0,1	1		5		20		1		5		20	
2	0,2	2		10		40		2		10		40	
3	0,3	3		15		60		3		15		60	
4	0,4	4		20		80		4		20		80	
5	0,5	5		25		100		5		25		100	
6	0,6	6		30		120		6		30		120	
7	0,7	7		35		140		7		35		140	
8	0,8	8		40		160		8		40		160	
9	0,9	9		45		180		9		45		180	
10	1,0	10		50		200		10		50		200	

По данным таблицы 2 построить график зависимости вероятности потерь от интенсивности нагрузки и количества обслуживающих устройств.

#### 4. Оценка вероятности потерь (контрольные вызовы)

Полагаем, что для оценки вероятности потерь производят контрольные испытания (вызовы). Производят  $n$  вызовов, из них  $n_0$  оказываются неуспешными, тогда оценка вероятности потерь равна  $p=n_0/n$ , которая распределена по биномиальному закону (схема Бернулли)

$$F(p) = p(P < p) = \sum_{k=1}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$$

Значение этого выражения равно вероятности того, что истинное значение вероятности потерь не превышает величины  $p$ , т.е. характеризует достоверность полученных результатов. Как видно из формулы, значение этой вероятности зависит от  $n$  – количества испытаний (попыток). Данное выражение можно использовать для оценки необходимого количества испытаний (попыток), чтобы показать, что истинное значение вероятности не превышает  $p$ .

Проверьте данное утверждение с помощью имитационного моделирования СМО с потерями, простейшим входящим потоком и



экспоненциальной функцией распределения времени обслуживания (как в п.2.1).

Для этого выполнить ряд экспериментов и оценить вероятность того, что истинное значение вероятности потерь не превышает заданного значения  $p$ .

#### **4 Выводы**

1. Ответить на вопрос почему при выполнении п.2.3.1 оценка вероятности потерь была равна 0,5?

2. Насколько близки данные полученные в результате имитационного моделирования в п. 2.3.2 к результатам вычисления 1 формулы Эрланга?

3. Как изменяется вероятность потерь при росте удельной интенсивности нагрузки для групп с различным количеством обслуживаемых устройств?

4. Как влияют свойства потока на вероятность потерь. Насколько отличаются результаты, которые дает 1 формула Эрланга от результатов имитационного моделирования для примеров треугольного и равномерного распределений интервалов между заявками?

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОЖИДАНИЕМ

#### 1. Система массового обслуживания с ожиданием

СМО с ожиданием в теории сетей связи применяется весьма часто, в частности, для моделирования сети с коммутацией пакетов. При этом обслуживающее устройство ассоциируется с линией связи (каналом передачи данных), а очередь с буфером в узле связи. Время обслуживания заявки (пакета) имитирует время передачи пакета по линии передачи данных, а время пребывания в очереди – время ожидания в узле связи. Время доставки является суммой времени ожидания и времени передачи пакета.

Из теории массового обслуживания и теории телетрафика известны некоторые аналитические модели СМО с ожиданием, а также с комбинированной дисциплиной обслуживания. Выбор той или иной модели зависит от свойств входящего потока, а также от свойств процесса обслуживания.

Цели данной работы состоит в освоении системы имитационного моделирования и изучении моделей СМО с ожиданием.

План работы:

1. Построить имитационную модель СМО с ожиданием, выполнить ее валидацию.
2. Получить и сопоставить результаты имитационного и аналитического моделирования на примерах СМО М/М/1 и М/D/1.
3. Модифицировать имитационную модель в модель многофазной СМО и исследовать ее функционирование (на примере двухфазной СМО).
4. Сформулировать полученные результаты и сделать выводы.

#### 2. Построение имитационной модели

##### 2.1 Построить структуру модели СМО М/М/1 в системе AnyLogic

Для построения модели используются библиотечные элементы типов: source, delay, queue и sink, два параметра, одна переменная.

Элементы соединяются как показано на рисунке 1.

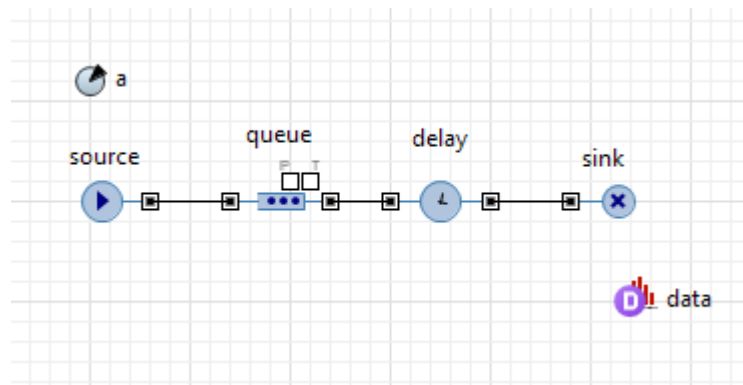


Рисунок 1 – Модель СМО

## 2.2 Создать новый тип заявки

Новому типу заявки дать имя Packet

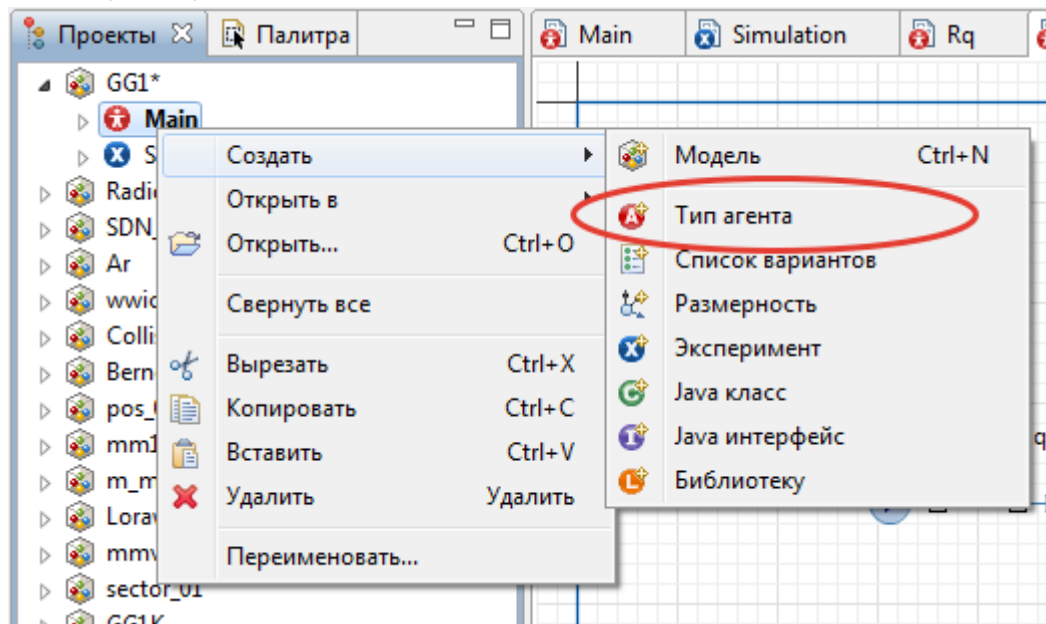


Рисунок 2 – Создание нового типа заявки

**Примечание.** Если вы используете раннюю версию AnyLogic (до 7.0), то для создания нового типа заявки необходимо создать «Java класс», выбрав в качестве базового класса класс «Entity» и используя мастер создания класса (нажимая кнопку «далее») в соответствующей форме создать параметры дав им аналогичные имена и определив доступ «public» и аналогичные начальные значения.

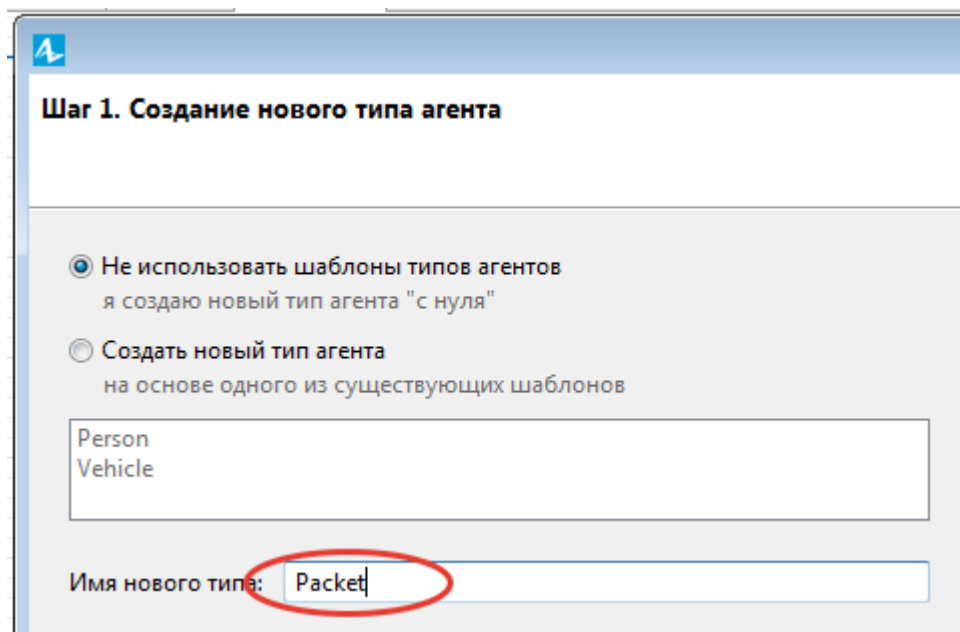


Рисунок 3 – Присвоение имени

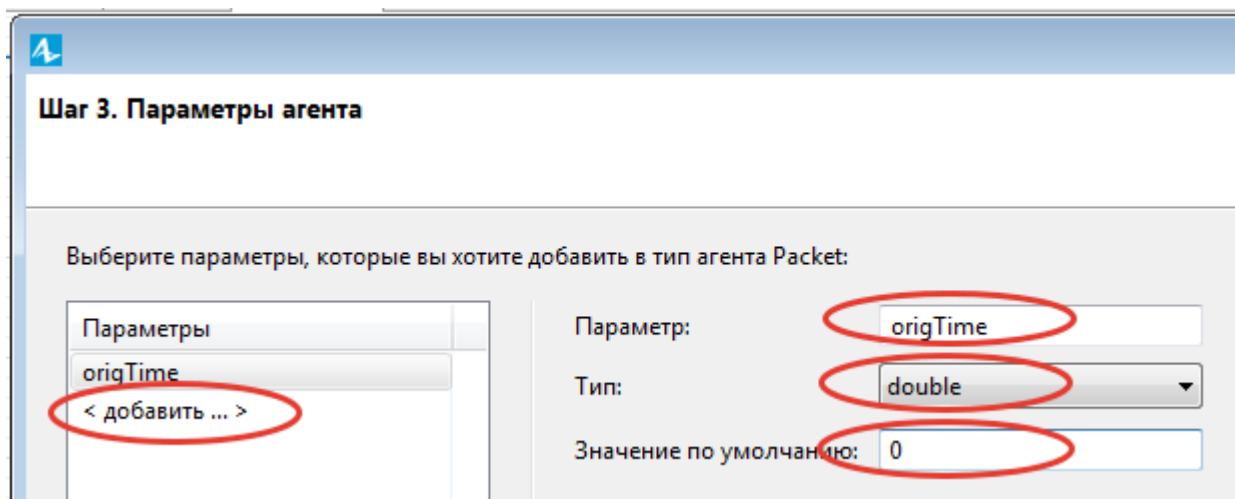


Рисунок 4 – Определение параметров заявки

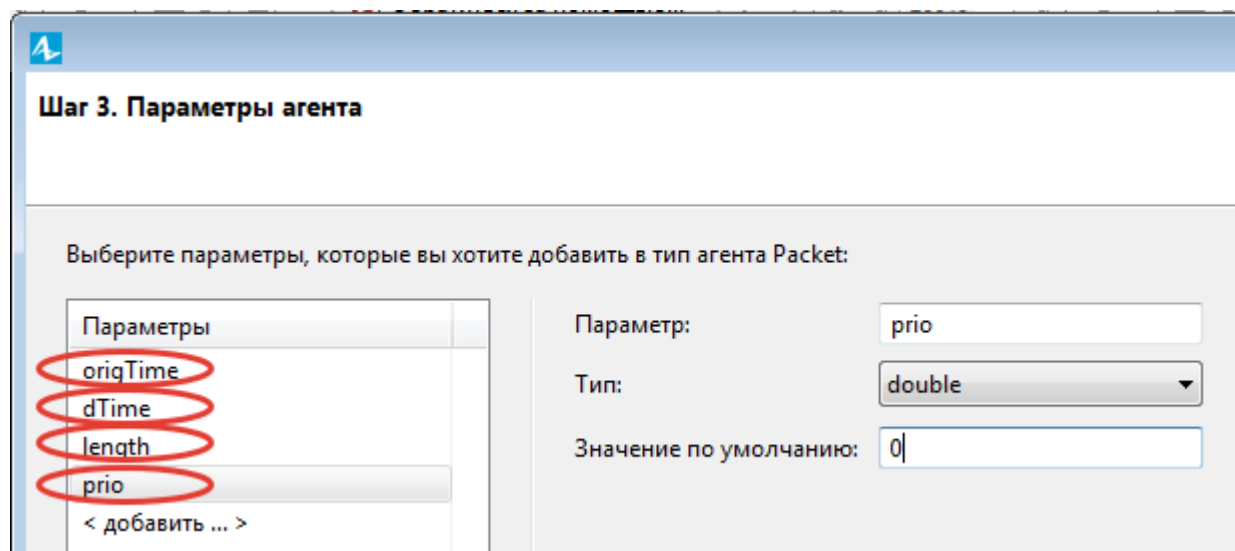


Рисунок 5 – Определение параметров заявки

## 2.2 Определить свойства элементов модели

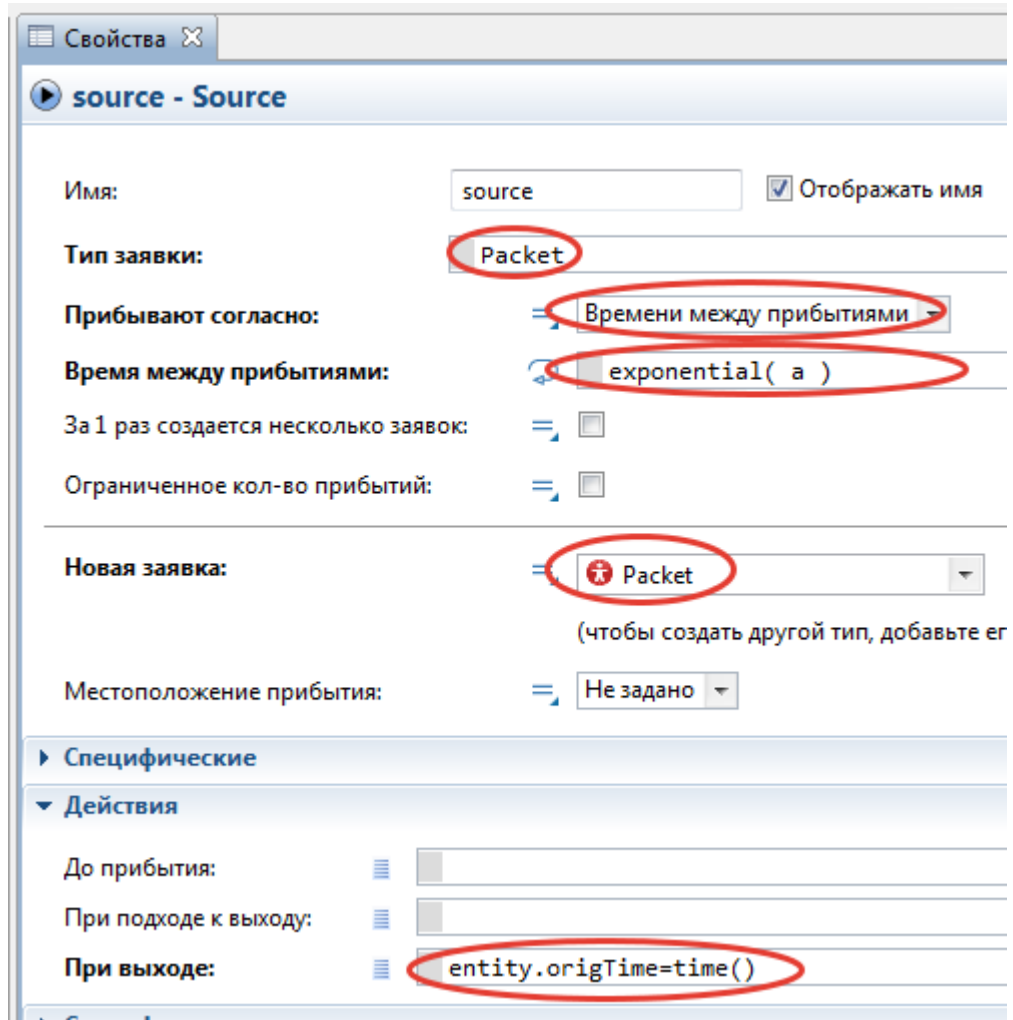


Рисунок 5 – Определение свойств элемента source

**Примечание.** Если вы используете раннюю версию AnyLogic (до 7.0), то в поле «Новая заявка» следует написать выражение «new Packet()» вместо выражения «new Entity()».

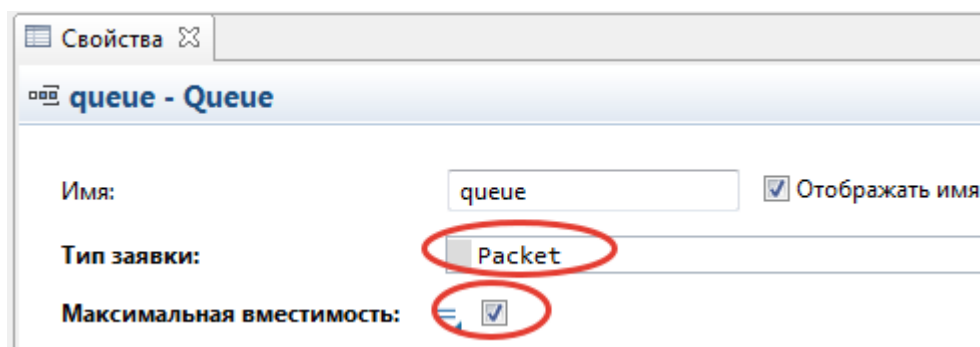


Рисунок 6 – Определение свойств элемента queue

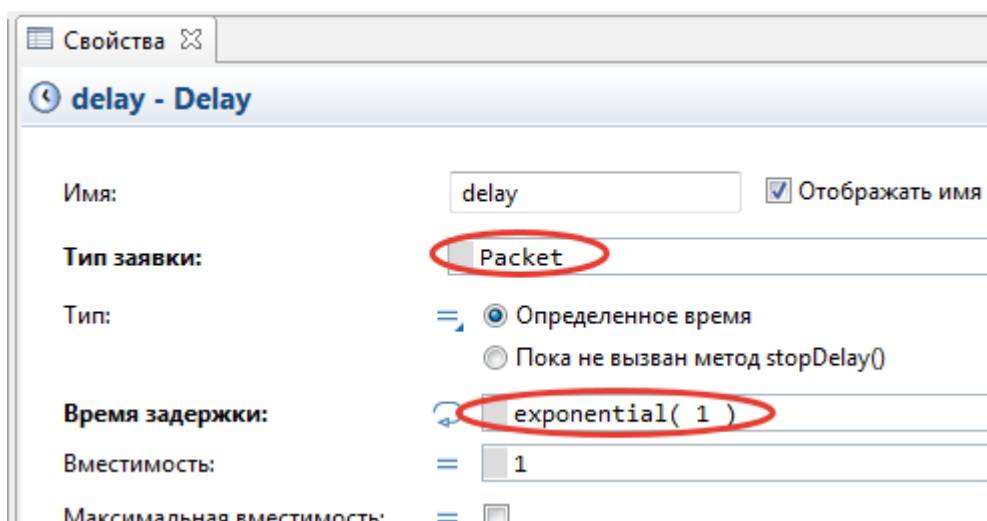


Рисунок 7 – Определение свойств элемента delay

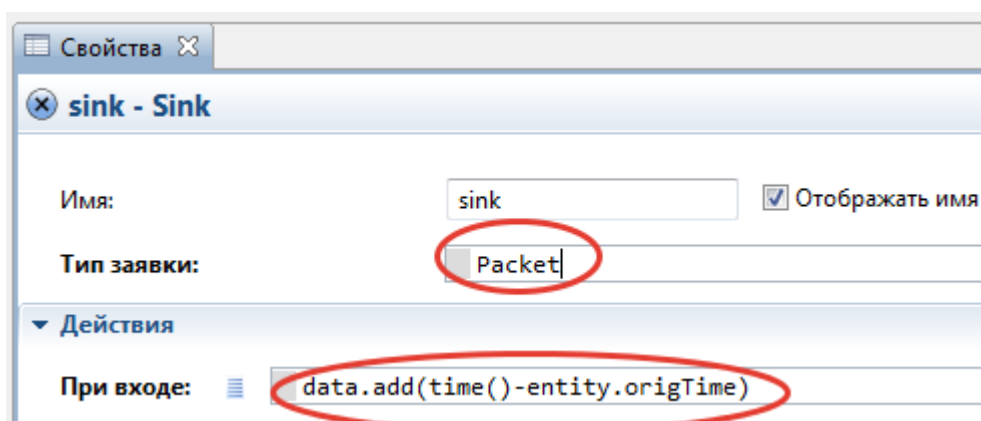
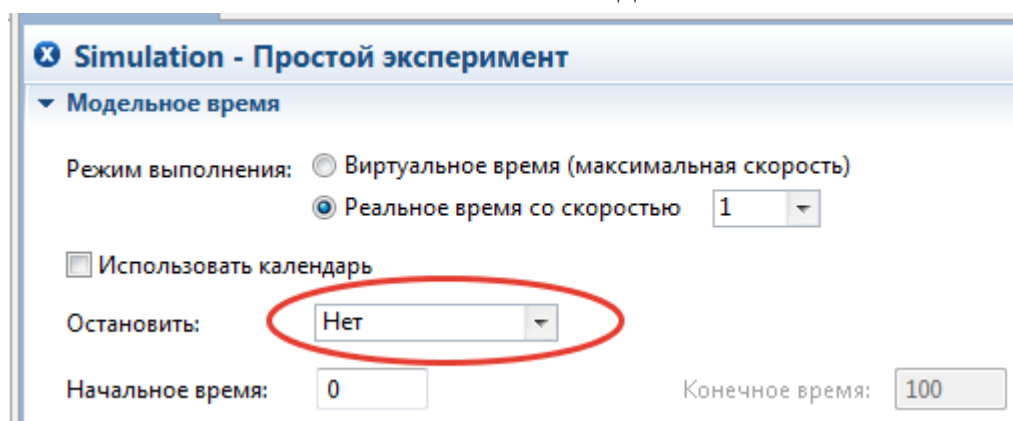


Рисунок 8 – Определение свойств элемента sink

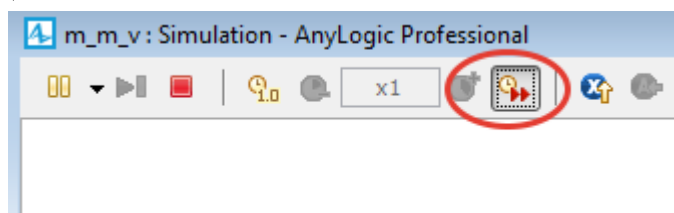
## 2.3 Валидация модели

### 2.3.1 Проверка функционирования

Произвести компиляцию и запуск имитационной модели (время остановки не задано



После успешной компиляции и запуска выбрать максимальную скорость работы модели



После нескольких секунд работы модели на максимальной скорости среднее значение времени доставки установится примерно равным 5 ед. времени.

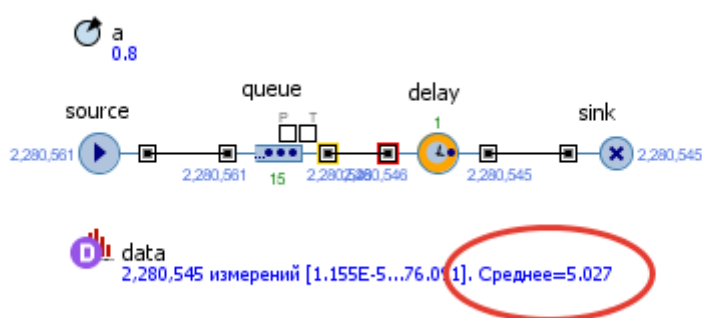


Рисунок 9 – Результат проверки модели

Если при компиляции обнаружены ошибки, проверить структуру модели и значения свойств ее параметров, внести исправления и повторить попытку компиляции и запуска.

### 2.3.2 Сравнение результатов с аналитической моделью

Выполнить ряд прогонов имитационной модели для двух типов СМО: М/М1 и М/D/1 с разным значением интенсивности нагрузки. Полученные оценки вероятности потерь занести в таблицу 3, округлять числа до 3 знаков после запятой.

Для аналитической модели М/М/1 выбрать выражение

$$T = \frac{\rho \bar{t}}{1 - \rho} + \bar{t}$$

Для аналитической модели М/D/1 выбрать выражение

$$T = \frac{\rho \bar{t}}{2(1 - \rho)} + \bar{t}$$

где интенсивность нагрузки

$$\rho = \frac{a}{\mu} = a\bar{t}$$

Таблица – 3 Оценки вероятности потерь для различных значений интенсивности нагрузки СМО М/М/1 и М/Д/1

N	a	М/М/1			М/Д/1		
		Время доставки		СКО времени доставки (им. мод.)	Время доставки		СКО времени доставки (им. мод.)
		Имит. модель	Аналит. модель		Имит. модель	Аналит. модель	
1	0,1						
2	0,2						
3	0,3						
4	0,4						
5	0,5						
6	0,6						
7	0,7						
8	0,8						
9	0,9						
10	0,99						

По данным таблицы 3 построить графики зависимости времени доставки от интенсивности нагрузки.

### 3. Исследование многофазной СМО

#### 3.1 Построение модели двухфазной СМО

Модифицировать модель СМО М/М/1 путем добавления двух новых элементов queue1 и delay1 (возможно копированием queue и delay), рисунок 10. Очередь queue1 должна иметь максимально возможную вместимость, а время обслуживания delay1 должно иметь экспоненциальное распределение со средним значением 1 (как и в queue и delay, соответственно).

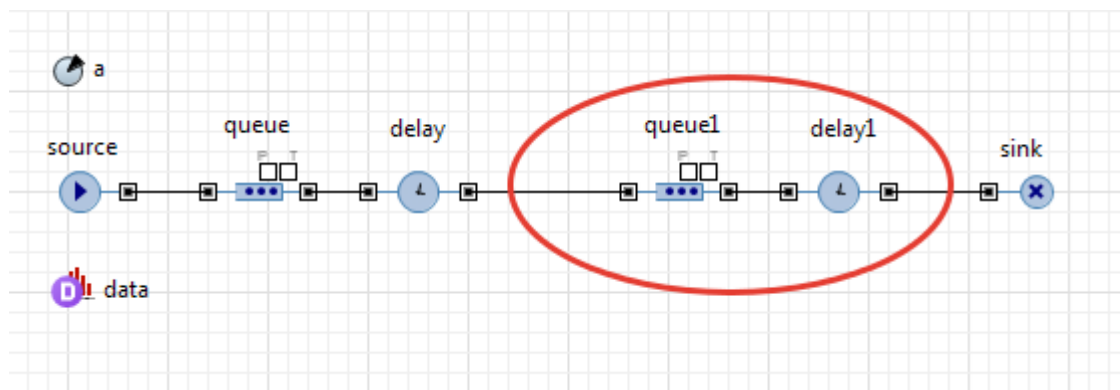


Рисунок 10 – Структура модели двухфазной СМО



Предусмотрим в модели возможность измерения времени прохождения заявкой первой и второй фаз обслуживания. Для этого введем еще два элемента «данные гистограммы». Первый из них «data1» будем использовать для измерения времени прохождения первой фазы, а второй «data2» для измерения времени прохождения второй фазы обслуживания. Имеющийся в модели элемент data сохранит свое назначение и будет использоваться для измерения общего времени доставки. Для этого добавим в свойства элементов delay и delay1 несколько строк, которые будут вычислять время прохождения заявкой соответствующего участка. Строки добавляются в поле «действие при выходе». Те команды, которые введены в это поле выполняются в момент, когда заявка покидает данный элемент, в нашем случае это окончание первой и второй фаз обслуживания, соответственно.

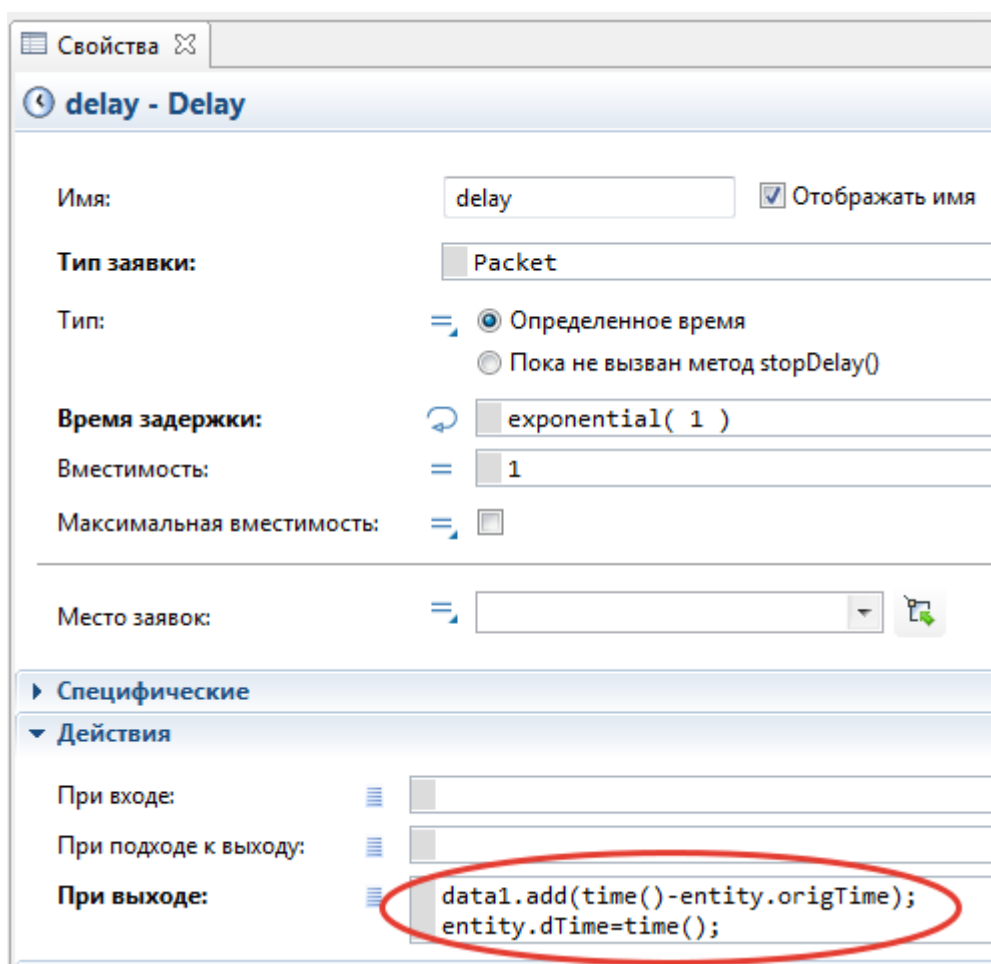


Рисунок 11 – Изменение свойств элемента delay

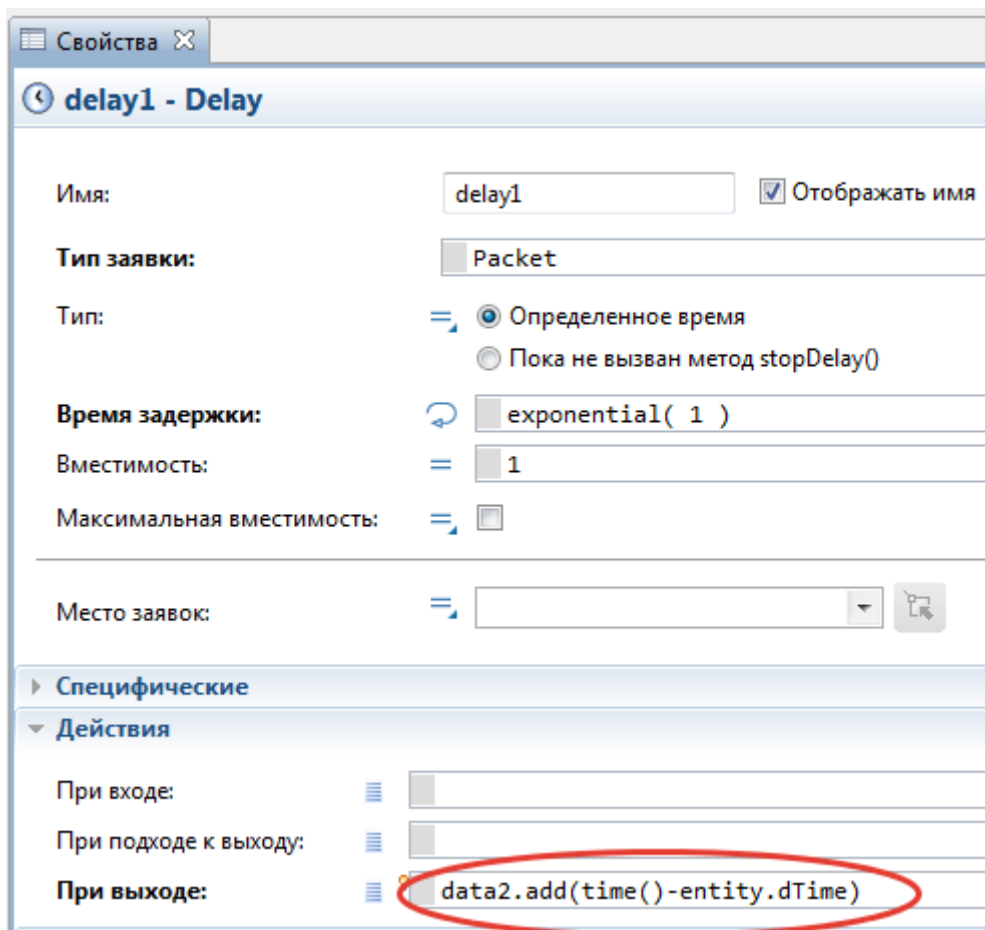


Рисунок 12 – Изменение свойств элемента delay1

Постройте гистограмму времени доставки, добавив в модель элемент «Гистограмма» из библиотеки «статистика». В свойствах этого элемента добавьте источник данных, который с учетом принятых на рисунке 10 наименований будет называться «data». В свойствах элемента «data» измените количество интервалов с 10 на 30, а «диапазон значений» выберете фиксированный: минимум 0, максимум 50. В результате моделирования будет построена гистограмма, подобная, приведенной на рисунке 11.

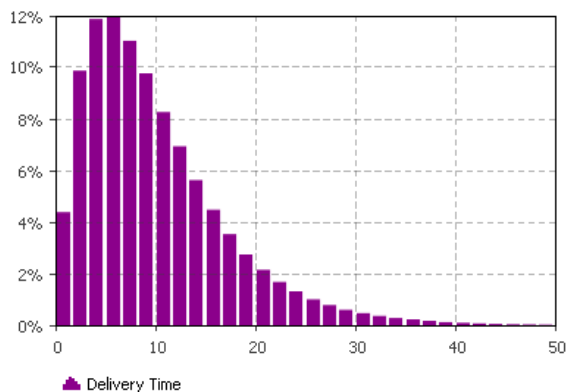


Рисунок 13 – Гистограмма времени доставки

Поясните смысл полученной гистограммы, какой закон распределения имеет время доставки в данном случае.

### 3.2 Валидация модели

Выполнить имитационное моделирование и оценить время доставки заявки от source до sink.

Если все сделано верно, то при интенсивности нагрузки  $a = 0,8$  среднее время доставки составит приблизительно 10 единиц времени. Объясните полученный результат с использованием результатов, полученных в п.2.3.2 этой работы. Подтвердите ваше объяснение еще двумя результатами, полученными при двух различных значениях интенсивности нагрузки (выберете значения самостоятельно).

## 4. Исследование функционирования двухфазной СМО

### 4.1 Влияние свойств системы обслуживания

Для исследования влияния свойств системы обслуживания на время доставки проведем три эксперимента: I, II и III.

**Эксперимент I** состоит в том, что время обслуживания на первой и второй фазах обслуживания случайно и имеет экспоненциальное распределение со средним значением 1. В свойствах элементов delay и delay1 в поле задержка должны быть выражения « $\text{exponential}(1)$ ». Провести серию экспериментов для различных значений интенсивности нагрузки  $a$ , результаты: среднее значение  $T$  и среднеквадратическое отклонение времени доставки  $S$  на первой и второй фазах обслуживания занести в таблицу 4.

**Эксперимент II** состоит в том, что время обслуживания на первой фазе обслуживания постоянно и равно 1, а на второй случайно и имеет экспоненциальное распределение со средним значением 1. В свойствах элементов delay и delay1 в поле задержка должны быть вписаны соответствующие выражения. Провести серию экспериментов для различных значений интенсивности нагрузки  $a$ , результаты: среднее значение  $T$  и среднеквадратическое отклонение времени доставки  $S$  на первой и второй фазах обслуживания занести в таблицу 4.

**Эксперимент III** состоит в том, что время обслуживания на первой и второй фазах обслуживания определяется свойствами самой заявки (длиной пакета). В данном случае оно будет случайно, но одинаково как на первой, так и на второй фазах обслуживания.



2	0,5												
3	0,8												
4	0,9												
5	0,99												

По результатам из таблицы 4 построить графики зависимости вероятности потерь от интенсивности нагрузки, для трех проведенных экспериментов.

По полученным результатам сделать соответствующие выводы.

## 5. Выводы по работе

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели СМО с ожиданием.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования на примерах СМО М/М/1 и М/D/1.
3. По результатам исследования многофазной СМО (на примере двухфазной СМО).

## Лабораторная работа №5

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ДИСЦИПЛИНОЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ

### 1. Система массового обслуживания с комбинированной ДО

Из теории массового обслуживания и теории телетрафика известны некоторые аналитические модели СМО с комбинированной ДО. Выбор той или иной модели зависит от свойств входящего потока, а также от свойств процесса обслуживания.

Цели данной работы состоит в освоении системы имитационного моделирования и изучении моделей СМО с комбинированной ДО.

План работы:

1. Построить имитационную модель СМО с комбинированной ДО, выполнить ее валидацию.
2. Получить и сопоставить результаты имитационного и аналитического моделирования на примере СМО М/М/1/к.
3. Модифицировать имитационную модель в модель многофазной СМО и исследовать ее функционирование (на примере двухфазной СМО).
4. Сформулировать полученные результаты и сделать выводы.

### 2. Построение имитационной модели

2.1 Построить структуру модели СМО М/М/1/к в системе AnyLogic

Для построения модели используются библиотечные элементы типов: source, delay, queue и sink, параметр, переменная (возможно использовать наработки из предыдущей лабораторной работы).

Элементы соединяются как показано на рисунке 1.

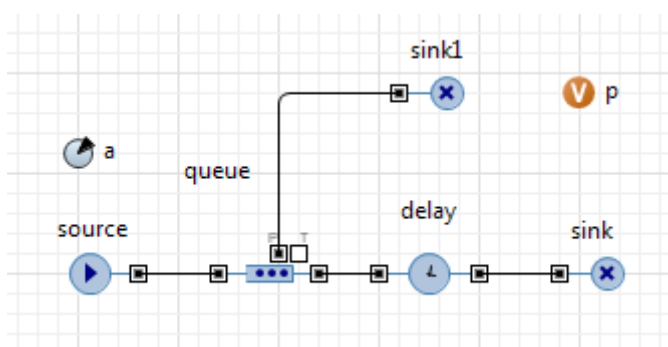


Рисунок 1 – Структура модели

## 2.2 Определить свойства элементов модели

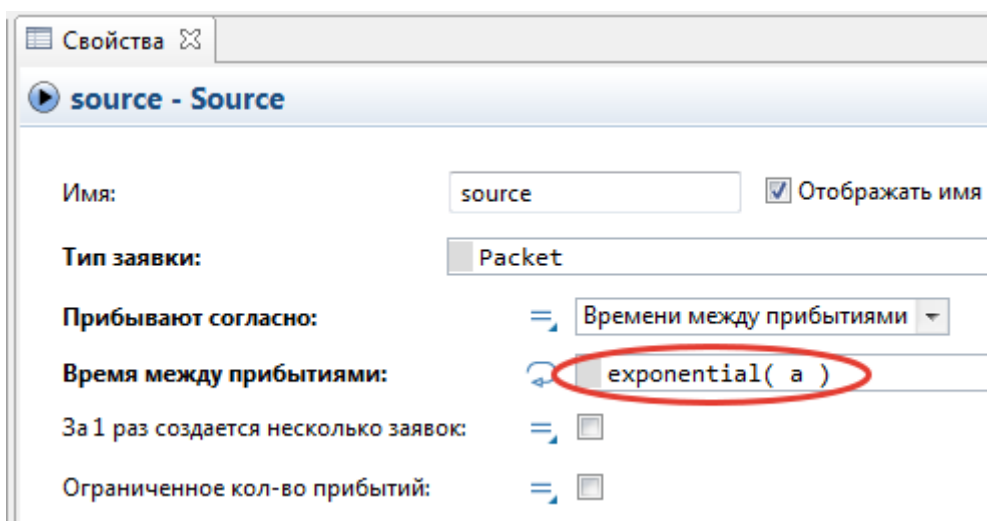


Рисунок 2 –Изменение свойств элемента source

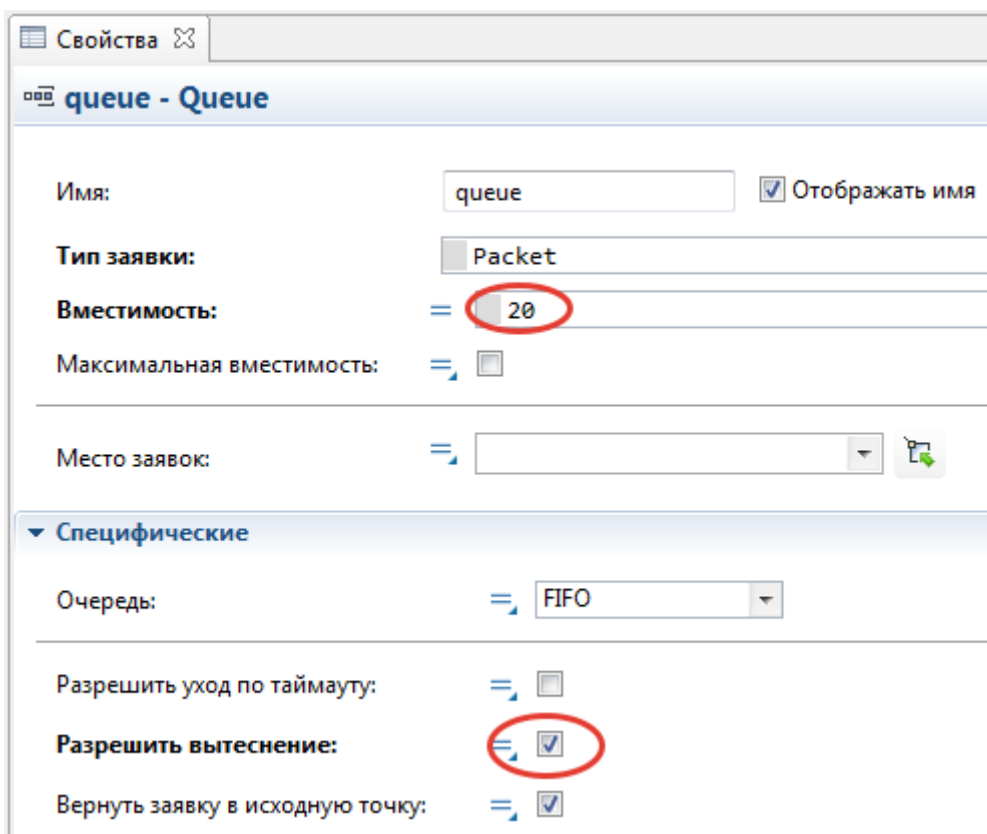


Рисунок 3 –Изменение свойств элемента queue

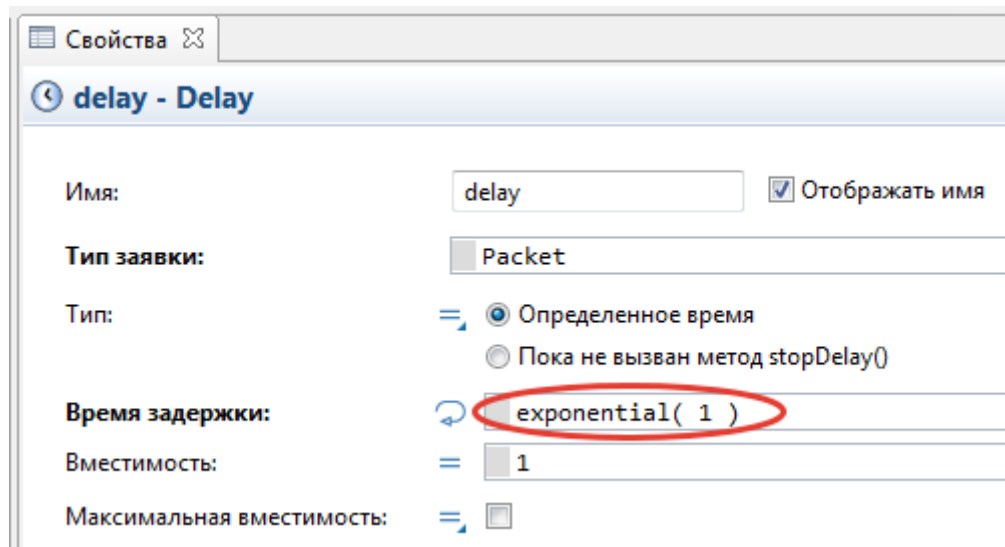


Рисунок 4 –Изменение свойств элемента delay

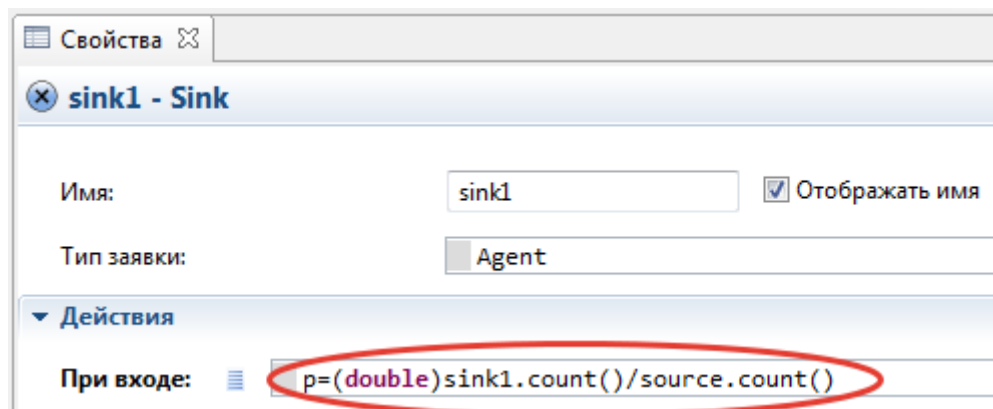


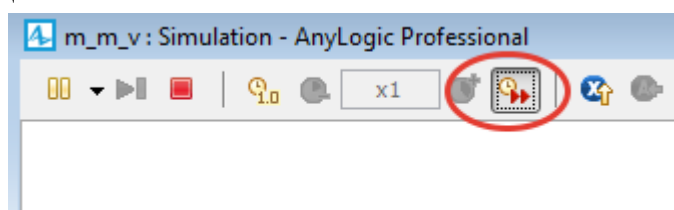
Рисунок 5 –Изменение свойств элемента sink1

## 2.3 Валидация модели

### 2.3.1 Проверка функционирования

Произвести компиляцию и запуск имитационной модели (время остановки не задано), значение интенсивности нагрузки выбрать  $a=0,9$ .

После успешной компиляции и запуска выбрать максимальную скорость работы модели







7	0,7												
8	0,8												
9	0,9												
10	0,99												

ИМ – имитационное моделирование,  
 АМ – аналитическое моделирование.

По данным таблицы 1 построить графики зависимости доли потерянных заявок от интенсивности нагрузки и длины очереди.

### 3. Исследование СМО G/G/1/K

#### 3.1 Построение модели СМО G/G/1/K

Модифицировать модель СМО M/M/1/K путем изменения свойств элементов source и delay. Структура и элементы модели приведены на рисунке 7.

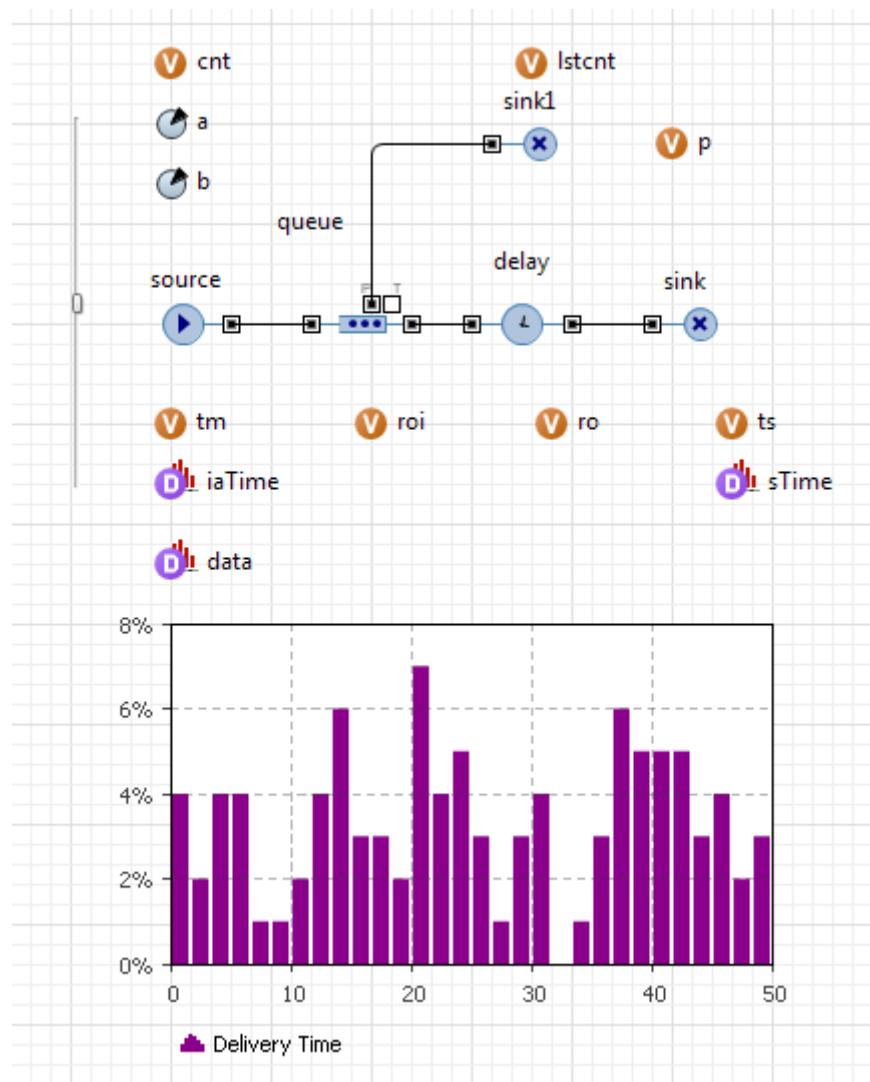


Рисунок 7 – Структура модели

### 3.2 Определить свойства элементов модели

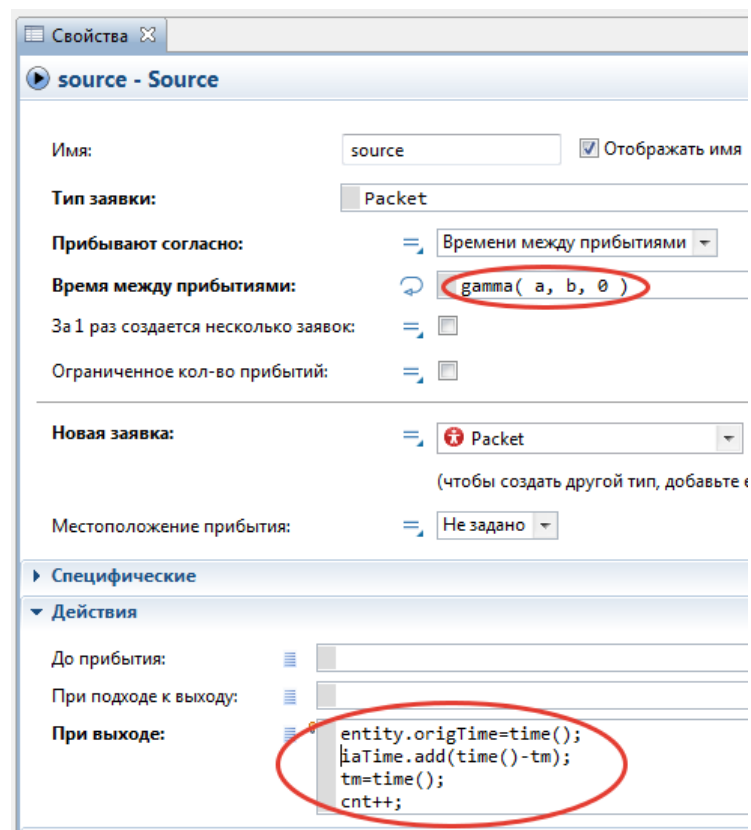


Рисунок 8 –Изменение свойств элемента source

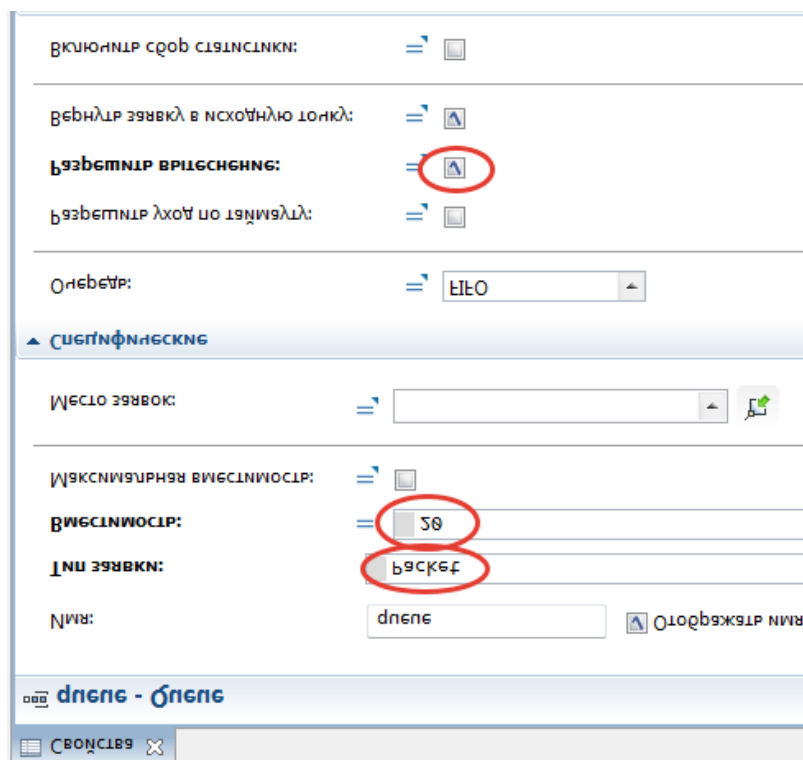


Рисунок 9 –Изменение свойств элемента queue

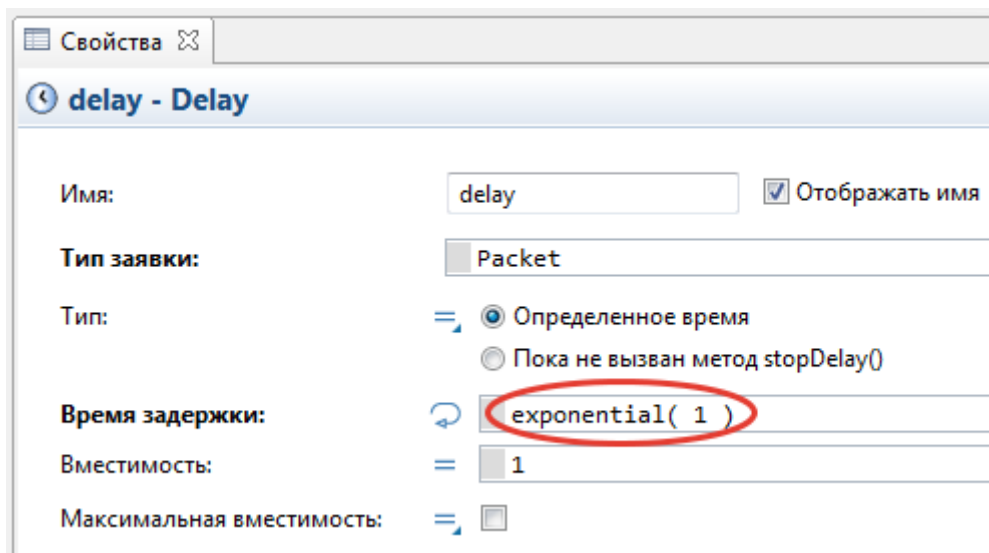


Рисунок 10 –Изменение свойств элемента delay

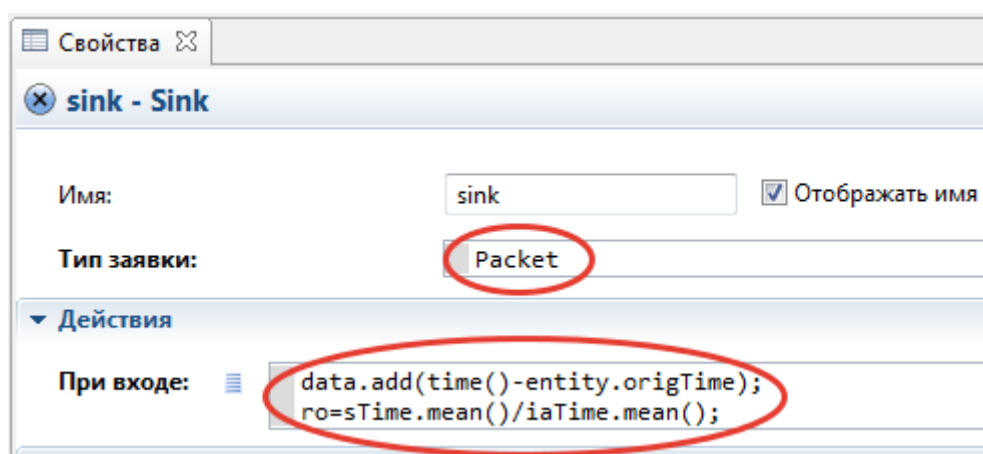


Рисунок 11 –Изменение свойств элемента sink

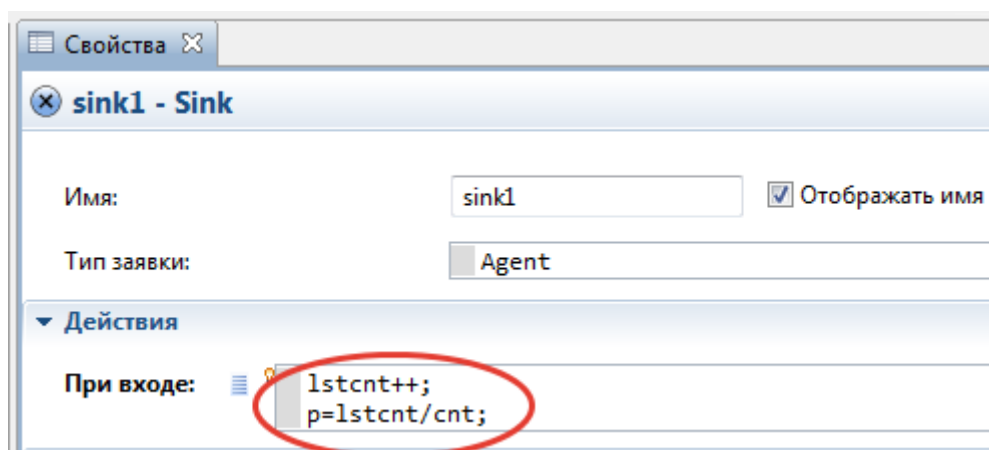


Рисунок 12 –Изменение свойств элемента sink1

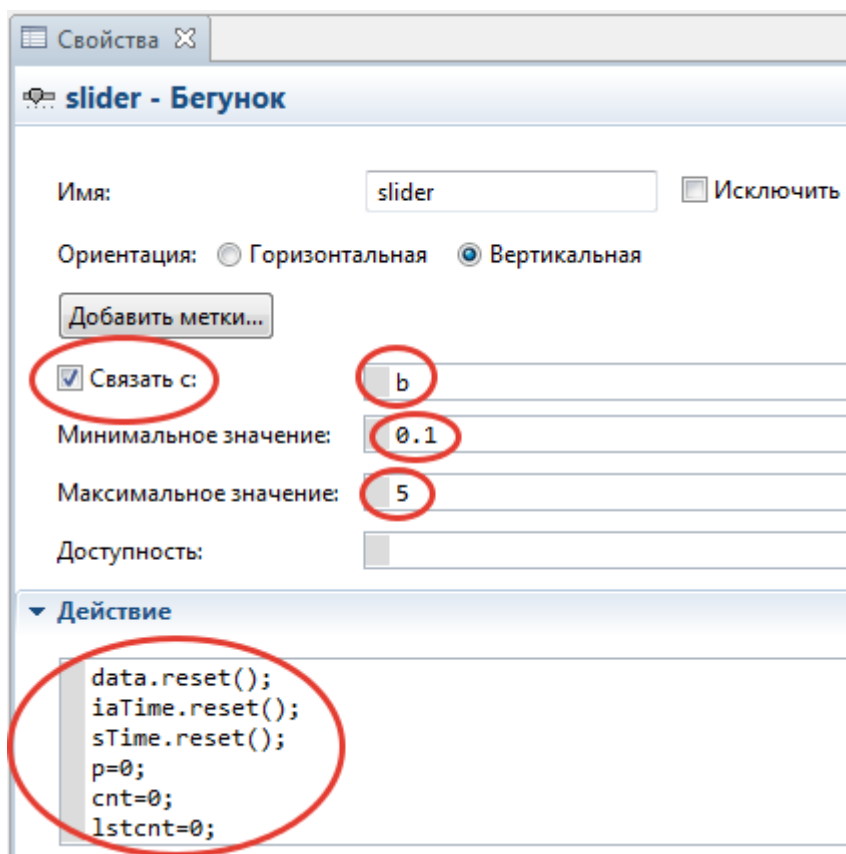


Рисунок 13 –Изменение свойств элемента slider

### 3.2 Проведение имитационных экспериментов

Выполнить имитационное моделирование для ряда значений интенсивности нагрузки  $a$  и количества мест ожидания в очереди. Полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица – 2 Оценки вероятности потерь для различных значений интенсивности нагрузки СМО G/G/1/K

N	$a$	Максимальная длина очереди (K-1)											
		5						10					
		$C_a$	$C_b$	$\tau$	$t$	им	ам	$C_a$	$C_b$	$\tau$	$t$	им	ам
1	0,1												
2	0,2												
3	0,3												
4	0,4												
5	0,5												
6	0,6												
7	0,7												

8	0,8												
9	0,9												
10	0,99												

им – имитационное моделирование,

ам – аналитическое моделирование.

$t$  – среднее время обслуживания,

$\tau$  – среднее интервала между заявками.

В качестве аналитической модели принять выражение

$$p \approx \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_b^2} K + 1}} \cdot \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_b^2} K}$$

$$\rho = \frac{t}{\tau}$$

По результатам из таблицы 2 построить графики зависимости вероятности потерь от интенсивности нагрузки и максимальной длины очереди.

По полученным результатам сделать соответствующие выводы.

## 5. Выводы по работе

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели СМО с комбинированной ДО.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования на примере СМО М/М/1/К.
3. По результатам исследования СМО G/G/1/К.

## Лабораторная работа №6

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПРИОРИТЕТНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ

## 1. Система массового обслуживания с приоритетным обслуживанием

Из теории массового обслуживания и теории телетрафика известны некоторые аналитические модели СМО с приоритетным обслуживанием. Выбор той или иной модели зависит от свойств входящего потока, а также от свойств процесса обслуживания.

Цели данной работы состоит в освоении системы имитационного моделирования и изучении моделей СМО с приоритетным обслуживанием.

План работы:

1. Построить имитационную модель СМО с приоритетным обслуживанием, выполнить ее валидацию.
2. Получить и сопоставить результаты имитационного и аналитического моделирования на примере СМО М/М/1/ с приоритетным обслуживанием.
3. Модифицировать имитационную модель в модель G/G/1 с приоритетным обслуживанием и исследовать ее функционирование.
4. Сформулировать полученные результаты и сделать выводы.

## 2. Построение имитационной модели

2.1 Построить структуру модели СМО М/М/1/ с приоритетным обслуживанием в системе AnyLogic

Для построения модели используются библиотечные элементы типов: source, delay, queue и sink, параметр, четыре элемента «данные гистограммы», гистограмма, слайдер (возможно использовать наработки из предыдущей лабораторной работы).

Элементы соединяются как показано на рисунке 1.

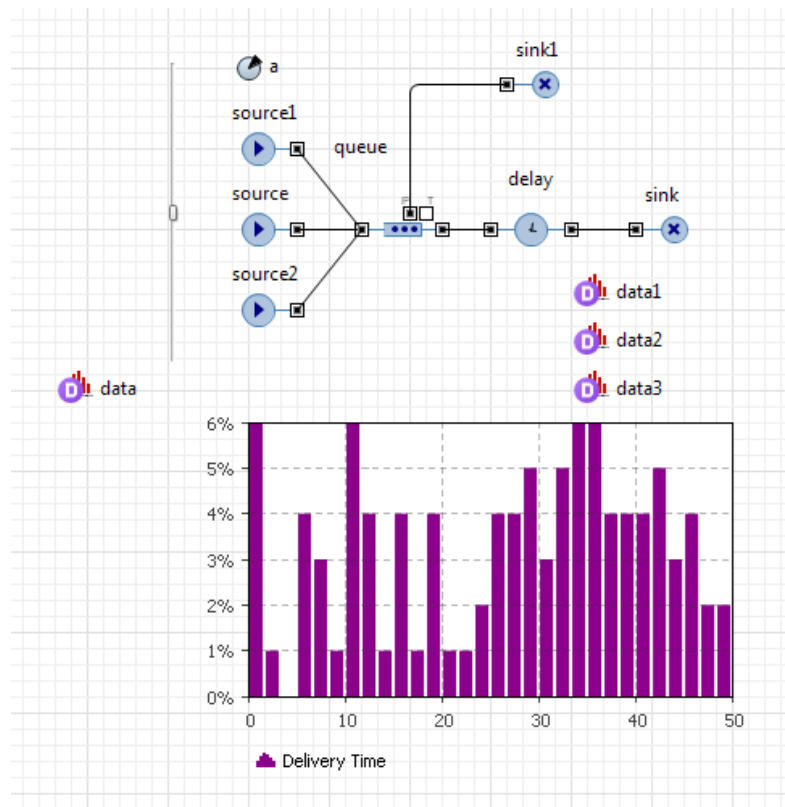


Рисунок 1 – Структура модели

## 2.2 Определить свойства элементов модели

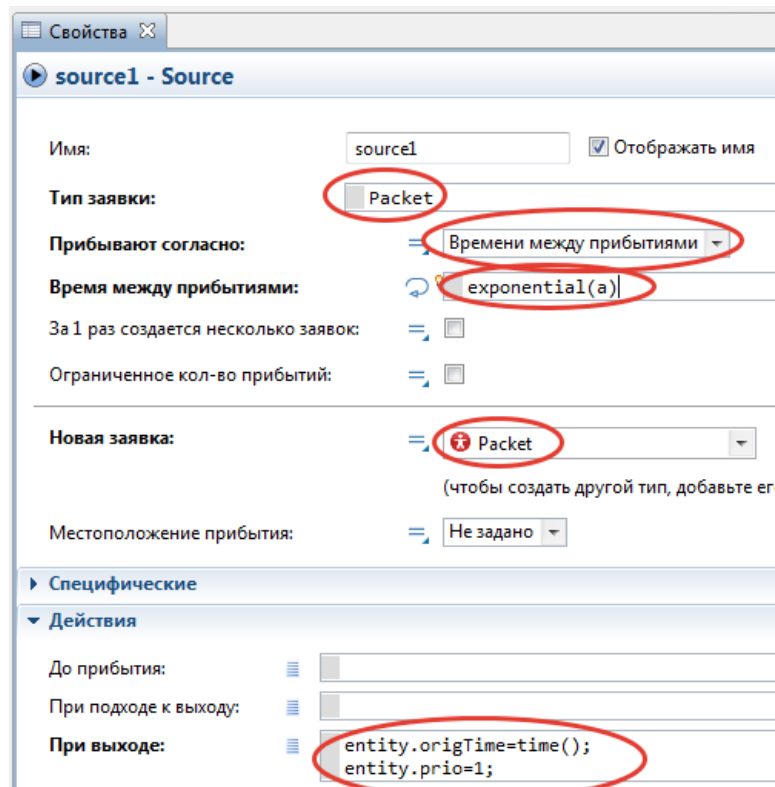


Рисунок 2 – Свойства элемента source1



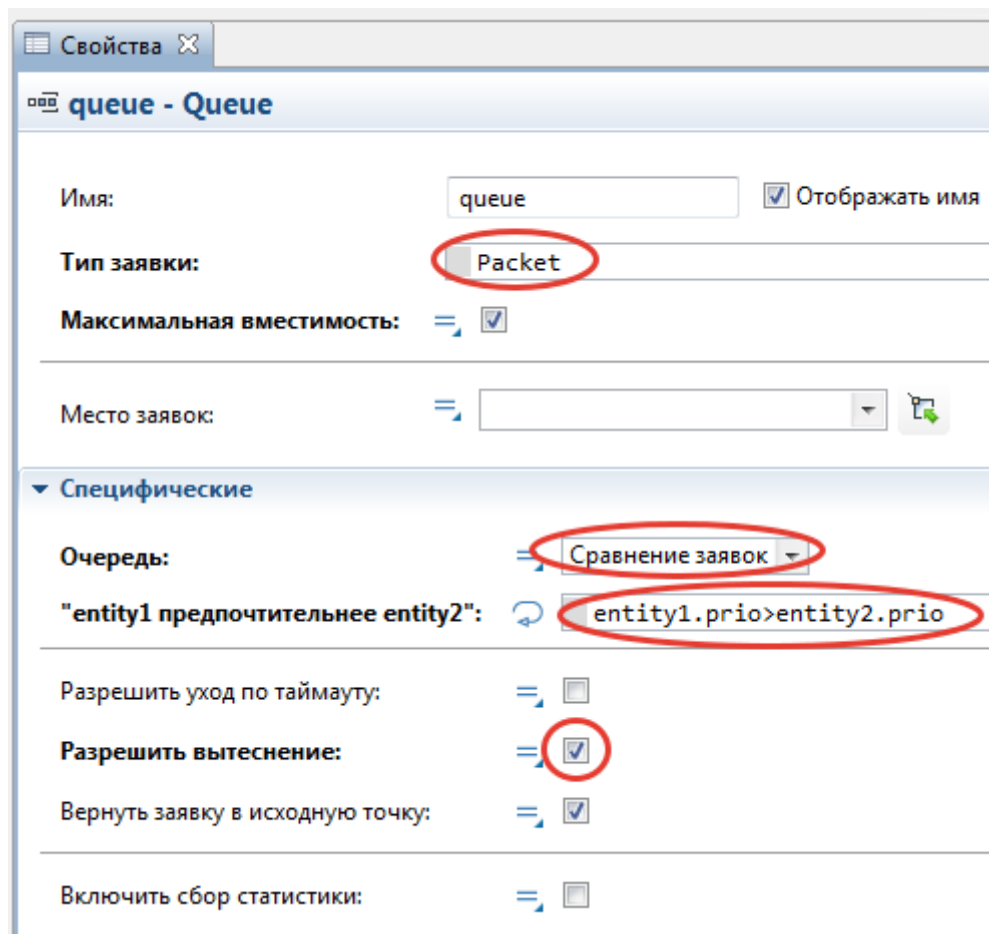


Рисунок 3 – Свойства элемента queue

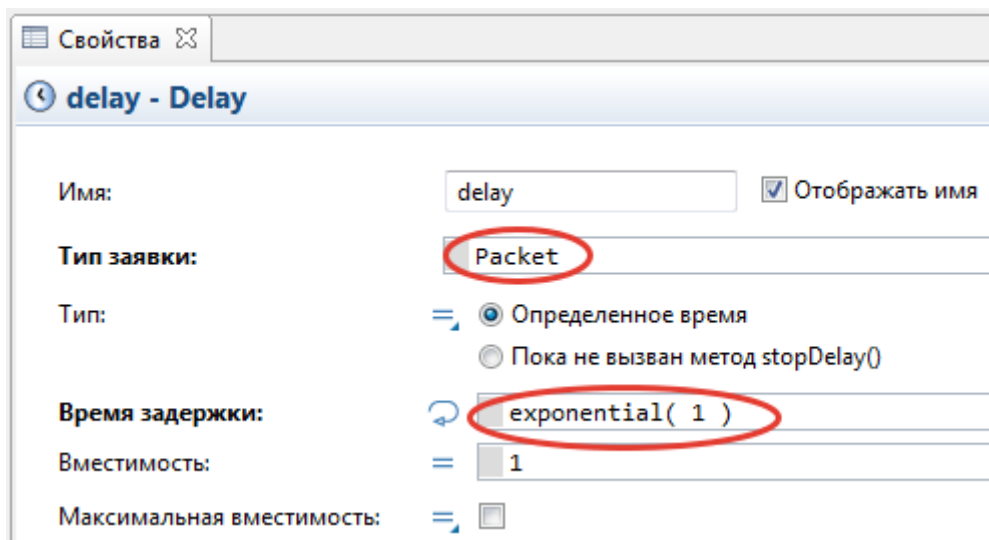


Рисунок 4 – Свойства элемента delay

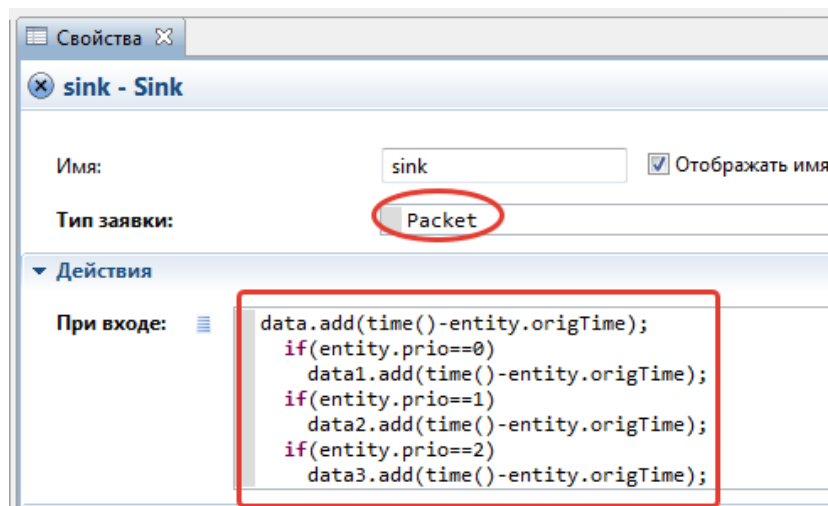


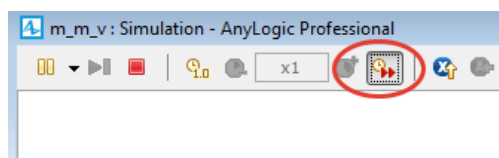
Рисунок 5 – Свойства элемента sink

## 2.3 Валидация модели

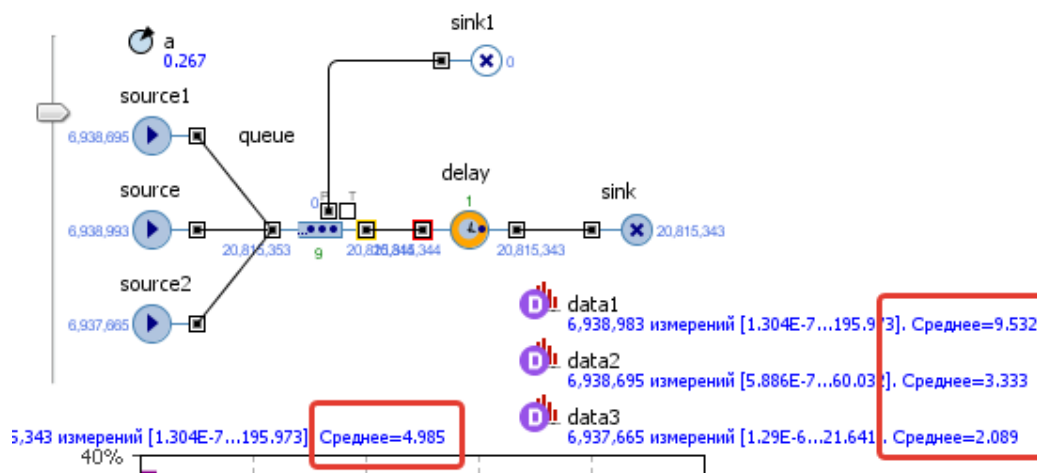
### 2.3.1 Проверка функционирования

Произвести компиляцию и запуск имитационной модели (время остановки не задано), значение интенсивности нагрузки выбрать  $a=0,9/3$  (деление на 3 задает равные интенсивности для каждого из трех источников, которые в сумме дают интенсивность нагрузки 0,9).

После успешной компиляции и запуска выбрать максимальную скорость работы модели



После нескольких секунд работы модели на максимальной скорости среднее время доставки для всех заявок составит примерно 5 единиц времени, а время доставки для заявок высшего приоритета (2), среднего (1) и низшего (0) составит 2,1; 3,3 и 9,5 ед.вр., соответственно (рисунок 6)





1	0,1						
2	0,2						
3	0,3						
4	0,4						
5	0,5						
6	0,6						
7	0,7						
8	0,8						
9	0,9						
10	0,99						

По данным таблицы 1 построить графики зависимости времени доставки от интенсивности нагрузки для заявок различного приоритета (по результатам имитационного моделирования).

### 3 Исследование СМО M/D/1 с приоритетным обслуживанием

Изменить свойства элемента delay для преобразования СМО к типу M/D/1.

Выполнить ряд прогонов имитационной модели для СМО M/D/1/K с разным значением интенсивности нагрузки. Полученные оценки времени доставки занести в таблицу 2, округлять числа до 3 знаков после запятой.

Для аналитической модели M/D/1 (для приоритетов 2 и 3) использовать следующее выражение, предварительно подставив в него нужное значение среднеквадратического отклонения

$$\bar{W}_K = \frac{1}{2(1-R_{K-1})(1-R_K)} \sum_{i=1}^M \rho_i \bar{t}_i \left( 1 + \left( \frac{\sigma_i}{\bar{t}_i} \right)^2 \right), K=2, 3$$

$$R_K = \sum_{i=1}^K \rho_i$$

$$R_{K-1} = \sum_{i=1}^{K-1} \rho_i$$

где интенсивность нагрузки

$$\rho_i = \frac{a}{\mu} = a_i \bar{t}$$

$M$  – общее количество приоритетов ( $M=3$ )

**Примечание.** В данном выражении меньшее значение  $K$  соответствует большему приоритету.

Для заявок высшего приоритета ( $K=1$ )

$$\bar{W}_1 = \frac{1}{2(1-\rho_1)} \sum_{i=1}^M \rho_i \bar{t}_i \left( 1 + \left( \frac{\sigma_i}{\bar{t}_i} \right)^2 \right)$$

Время доставки

$$T_K = W_K + \bar{t}$$

Таблица – 2 Оценки вероятности потерь для различных значений интенсивности нагрузки СМО М/D/1

N	a	Время доставки T					
		Имит. Модель			Аналит. Модель		
		Приор. 0	Приор. 1	Приор. 2	K= 3	K= 2	K = 1
1	0,1						
2	0,2						
3	0,3						
4	0,4						
5	0,5						
6	0,6						
7	0,7						
8	0,8						
9	0,9						
10	0,99						

По данным таблицы 2 построить графики зависимости времени доставки от интенсивности нагрузки для заявок различного приоритета (по результатам имитационного моделирования).

#### 4. Выводы по работе

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели СМО с приоритетным обслуживанием.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования на примере СМО М/М/1 с приоритетным обслуживанием.
3. По результатам исследования СМО М/D/1 с приоритетным обслуживанием.

## Лабораторная работа №7

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ОШИБКАМИ

#### 1. Модель канала передачи данных с ошибками

Будем полагать, что в канале передаются кадры, размер которых  $L$ , определяется длиной полезных данных  $U$  и длиной заголовка  $H$  (служебных данных)  $L=H+U$ . При передаче кадра в канале может произойти ошибка как в поле полезных данных, так и в заголовке кадра. Будем полагать, что применяемый протокол использует квитирование (подтверждение). В таком случае наряду с кадрами полезных данных в канале передаются служебные кадры, которые несут информацию о результате доставки данных. Будем также полагать, что канал является симплексным, т.е. одновременно возможна передача только в одном направлении. Как правило, такие каналы имеют место при использовании технологий радиосвязи.

Рассмотрим следующий алгоритм работы канала:

-передатчик передает кадры данных с некоторой интенсивностью  $a$ , поток кадров на выходе передатчика представляет собой простейший поток;

-полагаем, что в канале может произойти ошибка, вероятности ошибочного приема бит независимы и имеют равномерное распределение, а вероятность ошибки одного бита описывается вероятностью  $p_{ber}$ ;

-при успешном приеме кадра приемник отправляет в канал (передатчику) подтверждение успешного приема, при обнаружении ошибки в принятом кадре приемник отправляет в канал запрос на повторную передачу кадра;

-следующий кадр передается в канал только после получения от приемника подтверждения об успешном приеме предыдущего кадра;

-при приеме запроса на повтор передатчик повторяет передачу последнего переданного кадра;

Эффективность использования канала оценим долей полезных данных в общем объеме передаваемых данных

$$E = \frac{U}{(L+l)\bar{k}} \quad (1)$$

где  $U$  – объем полезных данных в кадре,  $L$  – общий объем данных в кадре данных,  $l$  – общий объем данных в служебном кадре,  $\bar{k}$  - среднее

количество передач из расчета на один кадр, в данной модели это количество случайно и имеет геометрическое распределение со средним значением

$$\bar{k} = \frac{1}{(1 - p_{ber})^L} \quad (2)$$

$(1 - p_{ber})^L$  - вероятность того, что кадр не будет содержать ошибок, т.е. вероятность успешного приема кадра.

Тогда, эффективность использования канала будет определяться как

$$E(U) = \frac{U(1 - p_{ber})^{(H+U)8}}{(H + U + l)} \quad (3)$$

На рисунке 1 приведена зависимость эффективности от размера полезной части кадра ( $p_{ber} = 0,001$ ,  $H=18$  байт,  $l=64$  байт).

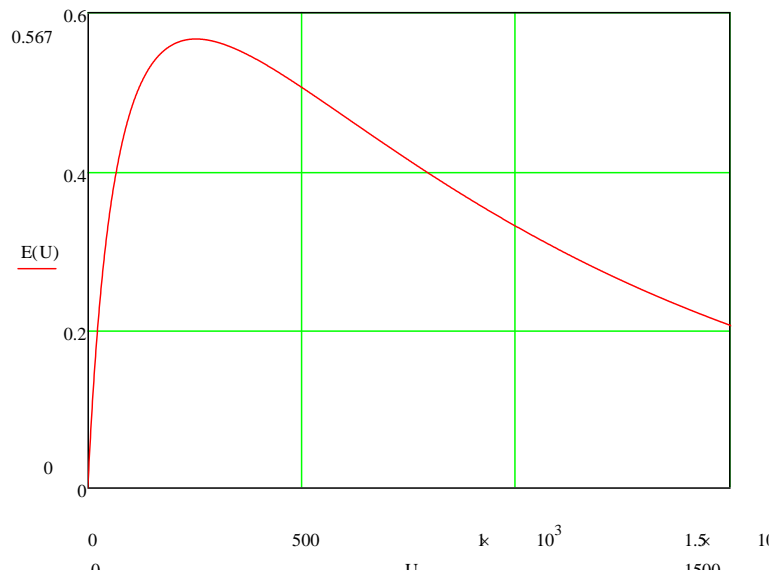


Рисунок 1 – Зависимость эффективности использования канала от размера полезной части кадра

Как видно из графика, зависимость имеет максимум при определенном значении размера полезной части кадра.

Целью данной работы является построение имитационной модели канала с ошибками, позволяющей найти оптимальное соотношение между параметрами канала, при котором достигается его максимальная эффективность.

## 2. Построение имитационной модели канала с ошибками

Для построения имитационной модели можно воспользоваться структурой, приведенной на рисунке 1.

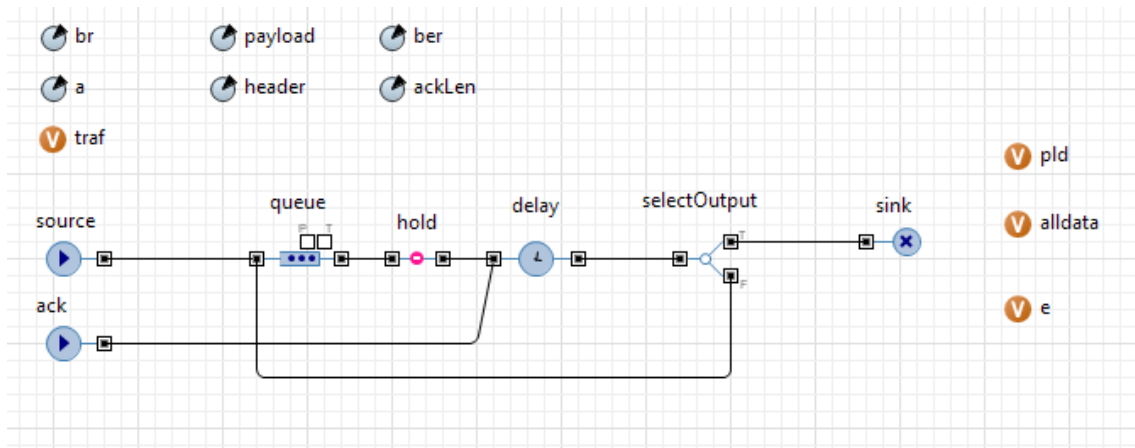


Рисунок 2 – Структура модели

Назначение элементов данной модели следующее:

source – производит исходный поток кадров (имитирует поток, производимый пользователем, в данном случае простейший поток);

ack – производит служебные кадры подтверждения/запроса. Работает в «ручном» режиме, кадр генерируется при вызове метода `ack.inject(1)`.

queue – служит для хранения кадров в то время, когда канал занят передачей.

hold – элемент, который «разрывает» соединение между элементами модели, его состоянием можно управлять функциями `hold.block()` и `hold.unblock()`.

delay – имитирует передачу кадра передатчиком с заданной скоростью.

selectOutput – элемент имитирует ошибку в принятом кадре, в случае ошибки кадр возвращается обратно в буфер для повторной передачи.

sink – получает все принятые кадры, в данном элементе ведется подсчет объема полезных данных.

Параметры:

br – скорость передачи данных в канале (бит/с);

a – интенсивность кадров, производимых источником кадров/с;

payload – объем полезных данных в кадре (байт);

header – длина заготовка кадра (байт);



ber – вероятность битовой ошибки;

ackLen – длина данных в кадре подтверждения / запроса.

Переменные:

pld – счетчик числа полезных данных, переданных через канал;

alldata – счетчик общего количества данных, переданных через канал.

e – оценка эффективности канала  $e = \text{pld} / \text{alldata}$ .

traf – загрузка канала.

Самостоятельно реализуйте алгоритм работы модели. Для проверки установите режим, согласно рисунку 3 и оцените полученные результаты.

Для упрощения модели, сделаем допущение о том, что кадры управления (подтверждения или запроса) передаются без ошибок.

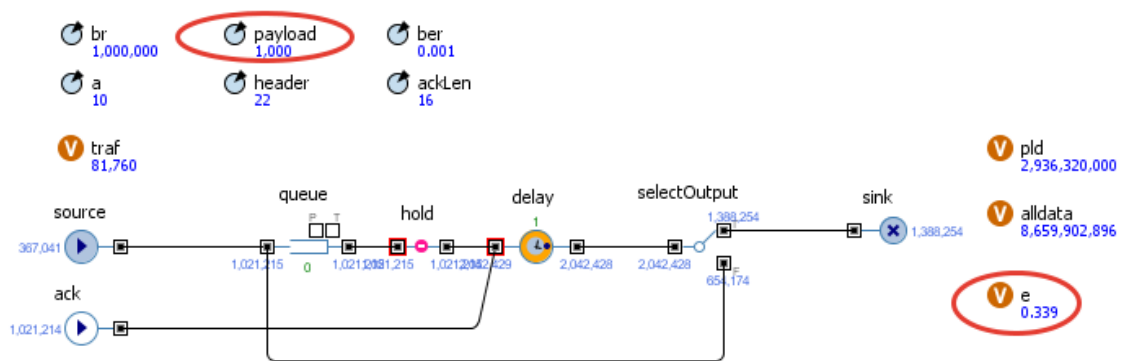


Рисунок 3 – Запуск модели

## 2. Оптимизация размера кадра

Для определения оптимального размера полезной части кадра создадим оптимизационный эксперимент. В качестве целевой функции выберем значение переменной  $e$  (оценку эффективности канала), в ходе оптимизации будем добиваться ее максимального значения.

На рисунке 4 приведена форма свойств оптимизационного эксперимента и результат оптимизации на рисунке 5.

Свойства Optimization - Оптимизационный эксперимент

Имя: Optimization  Исключить

Агент верхнего уровня: Main

Целевая функция:  минимизировать  максимизировать

Количество итераций: 500

Автоматическая остановка

Максимальный размер памяти: 256 МБ

← нажать в последнюю очередь

▼ Параметры

Параметры:

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
br	фиксированный	1000000			
a	фиксированный	10			
payload	дискретный	10	2000	1	10
header	фиксированный	22			
ber	фиксированный	0.001			
ackLen	фиксированный	16			

▼ Модельное время

Использовать календарь

Остановить: В заданное время

Начальное время: 0

Конечное время: 10000

Рисунок 4 – Свойства оптимизационного эксперимента

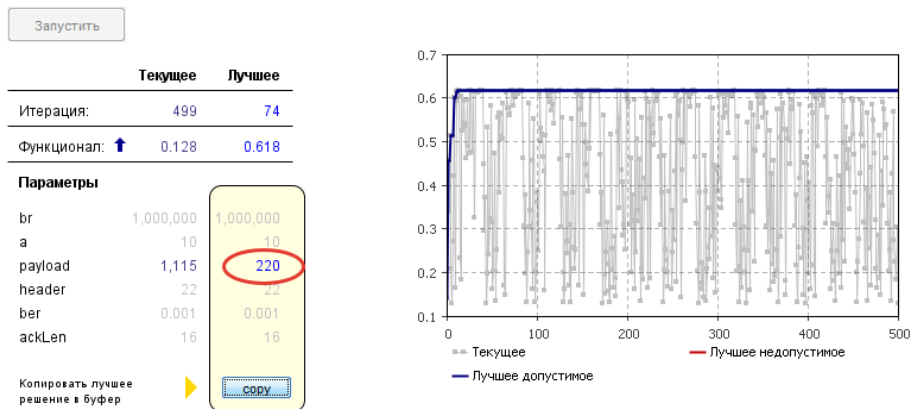


Рисунок 5 – Результат оптимизации

Проведите серию оптимизационных экспериментов, занесите результаты в таблицу 1 и постройте зависимость оптимального размера полезной части кадра от вероятности битовой ошибки.

Таблица 1 - Зависимость оптимального размера полезной части кадра от вероятности битовой ошибки

N	Вероятность битовой ошибки	Оптимальный размер полезных данных (байт)
1	0,000001	
2	0,00001	
3	0,0001	
4	0,0005	
5	0,0007	
6	0,001	
7	0,002	
8	0,005	
9	0,01	
10	0,05	

По данным таблицы 1 построить график зависимости и описать его (аппроксимировать) аналитической функцией, вид которой подобрать самостоятельно.

### **3. Выводы по работе**

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели канала с ошибками.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования канала с ошибками, по сравнению полученных результатов.
3. По результатам исследования оптимального размера полезной части кадра.

### **4. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и краткое описание проводимых исследований
2. Результаты проверки функционирования модели.
3. Таблицы с результатами экспериментов (Таблица 1)
4. График зависимости оптимального размера полезной части кадра от вероятности битовой ошибки.
5. Выводы по полученным в работе результатам.

## Лабораторная работа №8

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАнных С КОЛЛИЗИЯМИ (МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП)

#### 1. Модель канала передачи данных с коллизиями

Будем полагать, что в канале передаются кадры, размер которых равен  $L$ . Канал имеет множественный доступ, т.е. каждый из пользователей может занять канал передачей кадра данных. Если два или более пользователей одновременно передают в канале данные (кадры), то полагаем, что происходит коллизия, т.е. искажение всех одновременно передаваемых кадров, независимо от того на сколько пересеклись интервалы времени их передачи, лишь бы это пересечение было больше нуля. Алгоритм действий пользователя зависит от того, используется ли им механизм (процедура) предотвращения коллизий (конфликтов). Возможны два варианта: если такая процедура используется, то перед передачей происходит проверка состояния канала и передача начинается, только в случае, когда канал свободен; если такая процедура не используется, то передача может начаться в любой момент времени. В первом случае вероятность коллизий существенно снижается, во втором случае они представляют «нормальное» явление.

Передача данных без управления коллизиями допускается во многих случаях использования беспроводных каналов связи при малой величине использования канала (малой нагрузке). При этом передача может производиться как с подтверждениями приема, так и без подтверждений. Естественно, что в последнем случае вероятность того, что кадр не будет доставлен больше нуля, в этом случае для повышения вероятности доставки используется многократная передача кадра.

Допустим, что среднее время передачи одного кадра  $\tau$ , общая интенсивность передачи кадров  $\lambda$ . Оценим вероятность коллизии следующим образом. Конфликт происходит тогда, когда за время передачи кадра будет начата или закончена еще хотя бы одна передача. Иными словами, когда пересекутся интервалы передачи двух или более кадров, рис. 1

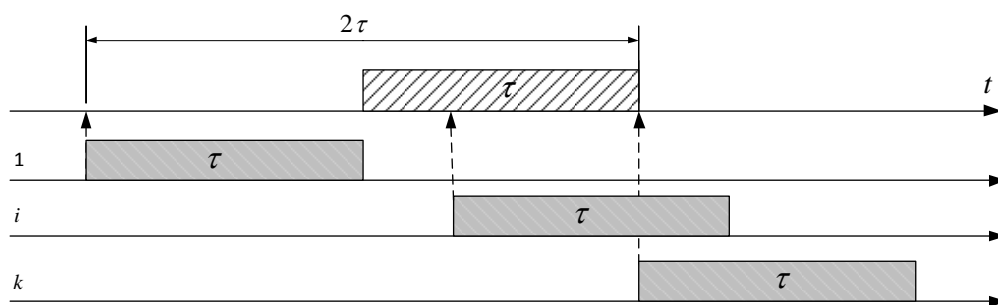


Рис.1 Иллюстрация процесса коллизий

Из иллюстрации видно, что для того чтобы произошло наложение двух и более передач, достаточно чтобы одна или более передач были начаты за интервал времени, равный  $2\tau$ , т.е. во время передачи рассматриваемого кадра или не позднее чем за время  $\tau$  до начала рассматриваемого кадра. Таким образом, вероятность коллизии равна вероятности начала одной или более передач кадров за интервал времени  $2\tau$

$$p_c = p_{\geq 1}(2\tau) = 1 - p_0(2\tau) \quad (1)$$

Если трафик можно описать моделью простейшего потока, то вероятность коллизии можно вычислить подставив в (1) формулу для вероятности распределение Пуассона  $p_k(x) = \frac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x}$ , тогда

$$p_c = 1 - e^{-\lambda 2\tau} \quad (2)$$

Аналогичный результат можно было получить рассматривая функцию распределения интервалов времени между моментами начала передачи кадров в простейшем потоке.

Все кадры, передача которых была начата на интервале  $2\tau$ , будут повреждены. Среднее количество поврежденных в результате коллизии кадров будет равно

$$m = 2\lambda\tau p_c \quad (3)$$

Интенсивность коллизий может быть определена как

$$\eta = \lambda p_c \quad (4)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (5)$$

$\lambda_i$  - интенсивность передачи (кадров)  $i$ -м узлом в зоне связи (кадров/с),  
 $k$  - количество узлов в зоне связи.

Использование модели простейшего потока весьма удобно, но не всегда оправдано, так как в большинстве случаев потоки трафика в современных сетях существенно отличаются от простейшего потока.

В данной работе исследуем последний случай, т.е. работу канала без механизма предотвращения коллизий и подтверждения доставки.

Целью работы является исследование зависимости вероятности коллизий от параметров абонентского трафика и оценка необходимого количества передач данных для обеспечения заданной вероятности доставки.

## 2. Построение имитационной модели

2.1 Построить модель канала с коллизиями, например, как показано на рисунке 2.

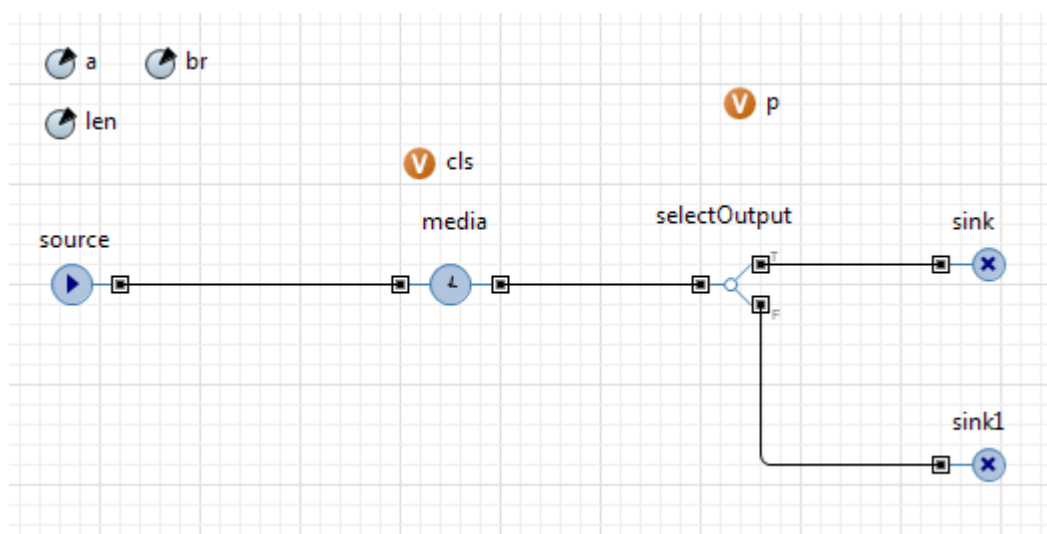


Рис.2 Структура модели

Назначение элементов модели:

source – генерация потока кадров (имитация трафика пользователей),  
media (элемент задержки - delay) имитация среды распространения,  
которая занимается на время передачи кадра,

cls – переменная, служит для подсчета одновременно передаваемых кадров;

br – параметр, определяющий скорость ПД в канале (бит/с);

a - параметр, определяющий интенсивность кадров (кадров/с).

len - - параметр, определяющий размер кадра (байт),

selectOutput – «сортирует» искаженные в результате коллизий кадры, направляя их в sink1 и неповрежденные кадры, направляя их в sink.

p – переменная, в которой вычисляется доля искаженных кадров.

Самостоятельно реализуйте алгоритм работы модели. Для проверки установите режим, согласно рисунку 3 и оцените полученные результаты.

Для упрощения модели, сделаем допущение о том, что поток кадров представляет собой простейший поток.

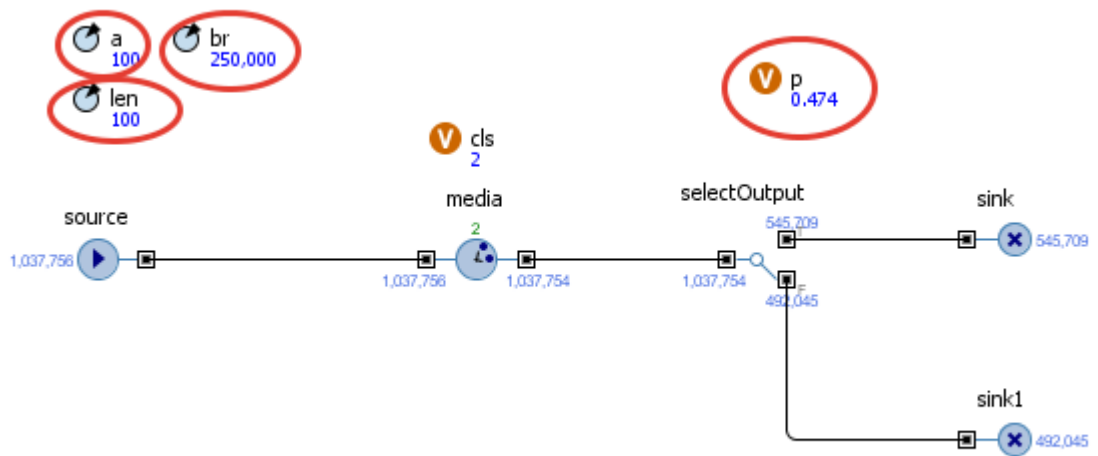


Рисунок 3 – Запуск и проверка модели

## 2. Исследование зависимости вероятности коллизий от нагрузки

Нагрузка (использование канала) определяется интенсивностью пакетов и их длиной. В обозначениях, принятых в нашей модели она равна

$$\rho = \frac{a \cdot len}{br} \quad (6)$$

Изменяя интенсивность пакетов получим значения вероятности коллизий для различных значений нагрузки. Занести полученные значения в таблицу 1.

Таблица 1 – Зависимость вероятности коллизий от интенсивности нагрузки

Интенсивность нагрузки	Вероятность коллизий	
	Имит. моделирование	Аналитический расчет
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		

По данным таблицы построить график зависимости вероятности коллизий от интенсивности нагрузки, сравнить результаты моделирования и аналитическую модель.

## 2. Исследование и оптимизация параметров передачи

### 2.1 Исследование параметров передачи

Отличная от нуля вероятность коллизий эквивалентна передаче с негарантированной доставкой. Во многих приложениях требуется, если не гарантированная доставка, то вполне определенная вероятность успешной доставки. В данной модели и работе будем полагать, что коллизии являются единственным фактором, приводящим к потере кадров данных. В случае использования протокола без подтверждения получения кадра, для повышения ее вероятности возможно использование многократного повторения кадра. Если вероятность потери кадра из-за коллизии равна  $p_c$ , то при повторении кадра  $k$  раз, вероятность его успешной доставки составит

$$p_s = 1 - p_c^k \quad (7)$$

Из этого выражения видно, что увеличение количества повторений кадра повышает вероятность доставки. Однако, если учесть то, что повышение количества повторений соответственно увеличивает нагрузку на канал, что влечет рост вероятности коллизий, согласно (2), тогда вычисление  $p_s$  с учетом (2), дает зависимость вероятности доставки от количества повторений кадра, которая приведена на рисунке 4.

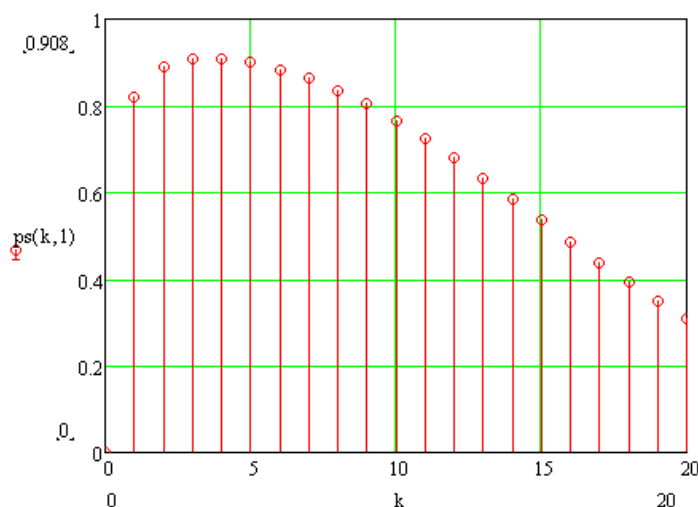


Рисунок 4 –Зависимость вероятности доставки от количества повторений кадра



Модифицируйте модель таким образом, чтобы исследовать данную зависимость и найти оптимальное количество повторений кадра, при котором достигается максимальная вероятность доставки данных. Результаты исследования занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Зависимость вероятности доставки кадра от количества повторений

Количество повторов фрейма	Вероятность доставки данных по результатам ИМ	Вероятность доставки данных по результатам аналитической модели
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

По данным таблицы 2 построить графики зависимостей.

## 2.2 Оптимизация параметров передачи

Создать имитационный эксперимент в котором определить в качестве целевой функции вероятность доставки данных, а к качестве параметра управления определить количество повторов. Используя оптимизационный эксперимент найти оптимальное количество повторов кадра для заданного значения загрузки канала.

### **3. Выводы по работе**

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели канала с коллизиями.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования канала с коллизиями, по сравнению полученных результатов.
3. По результатам определения оптимального количества повторов кадра.

### **4. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и краткое описание проводимых исследований
2. Результаты проверки функционирования модели.
3. Таблицы с результатами экспериментов (Таблица 1) и соответствующие графики.
4. Таблицы с результатами экспериментов (Таблица 2) и соответствующие графики.
5. Результаты поиска оптимального количества повторов кадра.
5. Выводы по полученным в работе результатам.

## Лабораторная работа №9

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С МЕХАНИЗМОМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ

#### 1. Модель множественного доступа с механизмом предотвращения коллизий

Будем полагать, что в канале передаются кадры, размер которых равен  $L$ . Канал имеет множественный доступ, т.е. каждый из пользователей может занять канал передачей кадра данных. Если два или более пользователей одновременно передают в канале данные (кадры), то полагаем, что происходит коллизия, т.е. искажение всех одновременно передаваемых кадров, независимо от того на сколько пересеклись интервалы времени их передачи, лишь бы это пересечение было больше нуля. Полагаем, что в данном случае перед передачей кадра пользователь анализирует состояние среды передачи и начинает передачу только в том случае, если среда свободна. Если среда передачи занята другим пользователем, по включается таймер отсрочки (задержки англ. – back off – откат назад) передачи, по истечении которой попытка передачи повторяется вновь. Величина задержки обычно выбирается как случайная (псевдослучайная) величина, она может иметь различные виды распределения вероятности, зависеть от номера попытки передачи и пр.

Функционирование такой системы можно описать моделью СМО с ожиданием, время обслуживания в которой определяется случайными процессами передачи данных в канале и таймером отсрочки передачи.

Использование таймера отсрочки предотвращает коллизии (в идеальном случае), но может приводить к недоиспользованию ресурса канала, т.к. заявки в некоторых случаях будут ожидать передачи дольше, чем это требуется (из-за случайного характера величины задержки). В этом смысле представляет интерес выбор метода формирования таймаута.

Функционирование канала будем описывать задержкой доставки кадра. Величина этой задержки зависит от времени ожидания и времени передачи по каналу.

Целью данной работы является исследование влияния метода формирования таймаута на использование ресурса канала.

## 2. Построение имитационной модели

Модифицируем модель, построенную в работе «Имитационное моделирование канала передачи данных с коллизиями», как показано на рисунке 1.

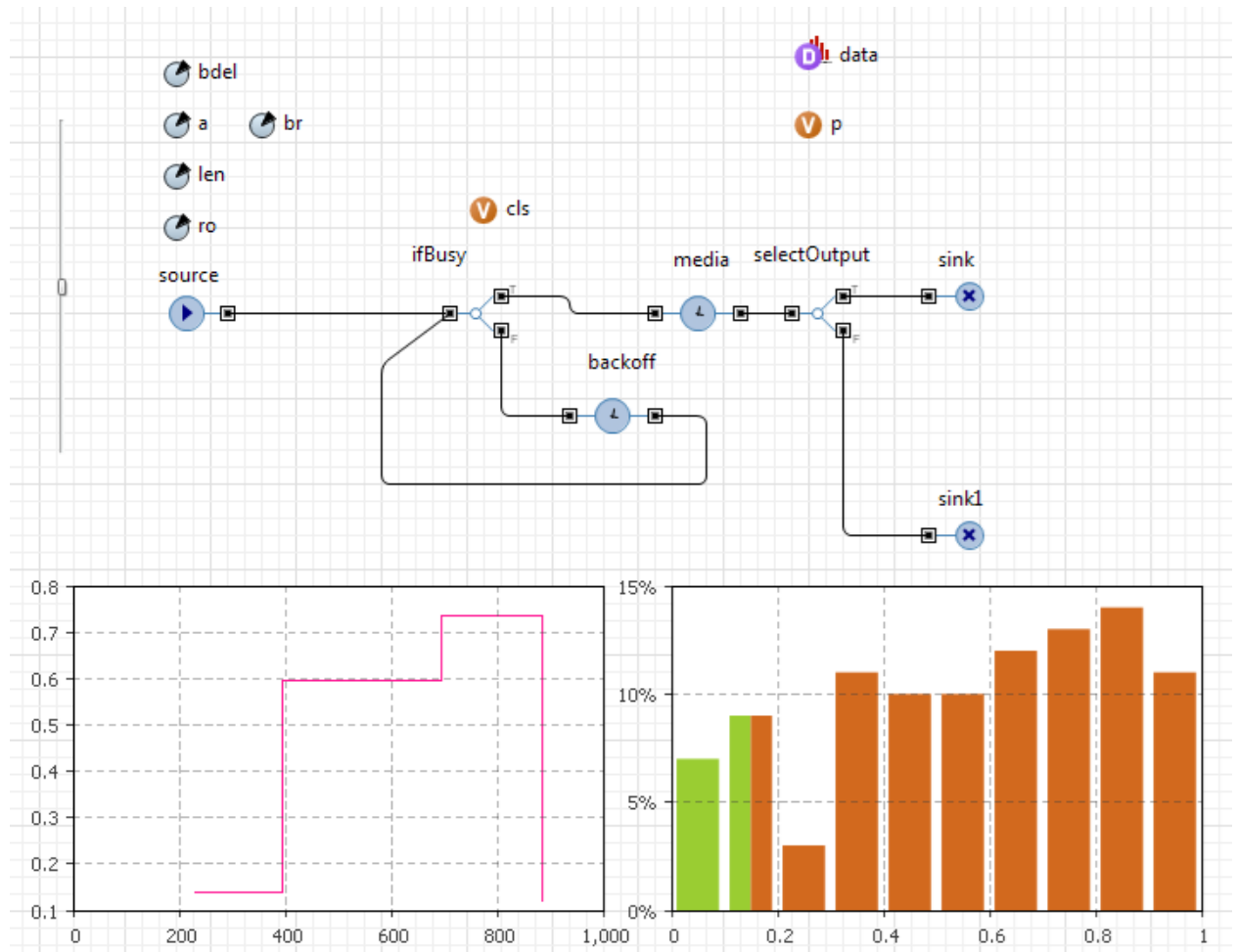


Рисунок 1 – Имитационная модель

В модель добавлен параметр  $ro$  в котором (для удобства) вычисляется интенсивность нагрузки  $ro = a * len * 8 / br$ .

Элемент `SelectOutput` с именем «ifBusy» направляет заявку в «media» по условию `media.size() = 0`, иначе заявка отправляется в элемент задержки «backoff» у которого выбрана максимально возможная вместимость, этот элемент имитирует таймер отсрочки. В его параметре задержки задается величина задержки. Выберем задержку случайной с экспоненциальным распределением вероятности и средним значением, задаваемым параметром `bdel`.

Элемент data служит для сбора статистики о времени доставки и построения гистограммы. Элемент «слайдер» соединен с параметром a и служит для установки интенсивности нагрузки в работающей модели.

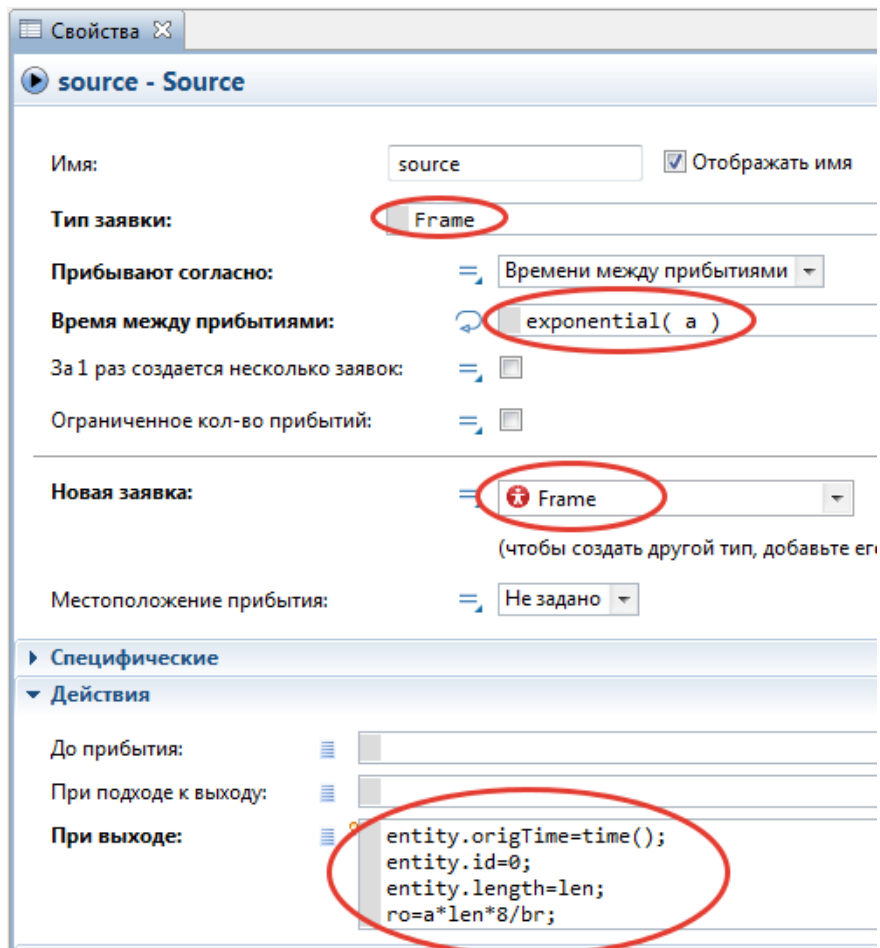


Рисунок 2 – Свойства source

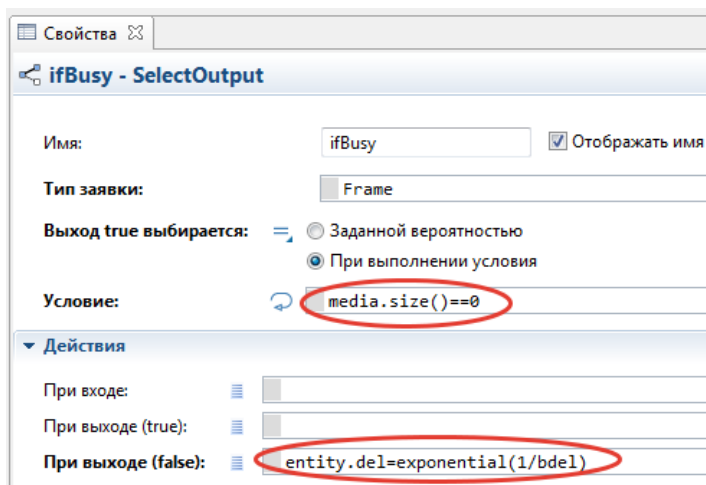


Рисунок 3 – Свойства SelectOutput

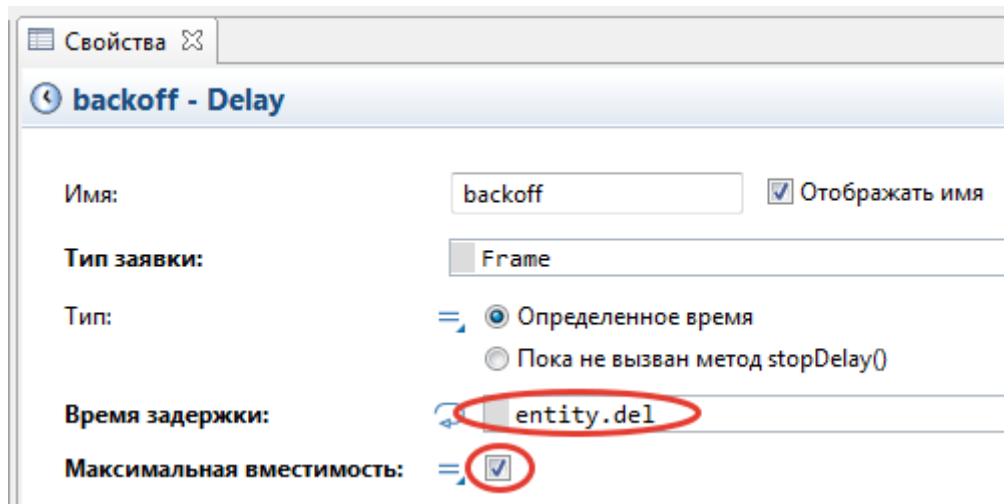


Рисунок 4 – Свойства delay

### 3. Проверка модели

Выполнить имитационное моделирование и сравнить результаты с приведенными на рисунке 5, сделать вывод о работоспособности модели.

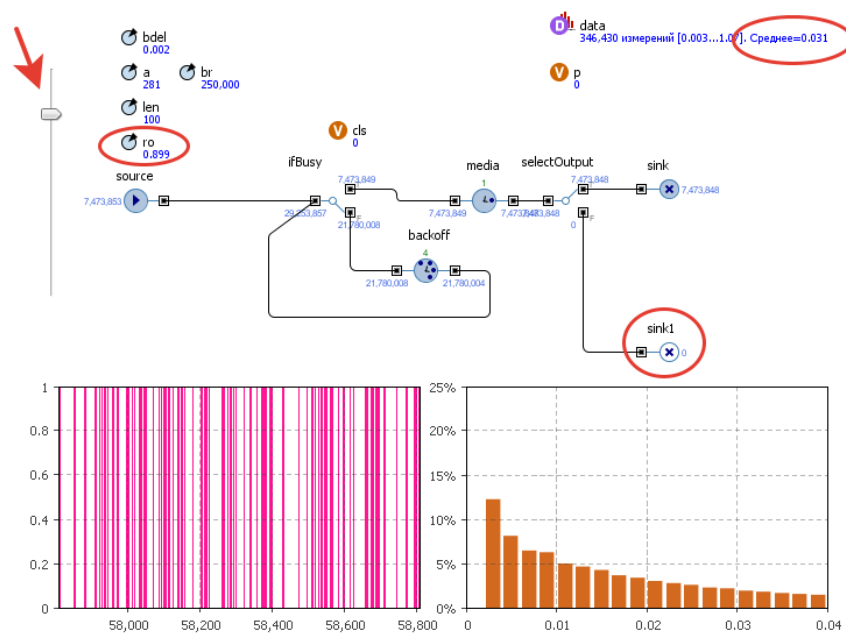


Рисунок 5 – Имитационная модель

#### 4. Исследование модели

Получить зависимость времени доставки кадра от среднего значения таймаута ожидания. Провести ряд экспериментов и занести полученные значения в таблицу 1.

Таблица 1 - Зависимость вероятности доставки кадра от количества повторений

Инт. Нагрузки ( $ro$ )	Время доставки кадра по результатам моделирования имитационного моделирования	Время доставки кадра по результатам аналитического моделирования
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
0,99		

По данным таблицы 1 построить графики зависимостей.

Найти оптимальное значение таймаута.

#### 3. Выводы по работе

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели канала с коллизиями.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования канала с коллизиями, по сравнению полученных результатов.
3. По результатам определения оптимального таймаута повторов кадра.

#### 4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и краткое описание проводимых исследований
2. Результаты проверки функционирования модели.
3. Таблицу с результатами экспериментов (Таблица 1) и соответствующие графики.

4. Таблицы с результатами экспериментов (Таблица 2) и соответствующие графики.

5. Результаты поиска оптимального количества повторов кадра.

5. Выводы по полученным в работе результатам.



## Лабораторная работа №10

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАФИКА VoIP

#### 1. Модель потока VoIP трафика

Трафик производимый, пользователем VoIP телефонии можно описать двумя процессами: процессом, описывающим поступление телефонных вызовов и процессом генерации пакетов данных, применяемым кодеком. Эти два процесса существенно отличаются масштабами времени. Если интенсивность вызовов, как правило, измеряется единицами вызовов за час, то интенсивность пакетов, производимых кодеками, определяется десятками в секунду. Таким образом, масштаб времени этих процессов отличается на 2...3 порядка. Абонент А производит вызов абоненту Б, на протяжении которого (во время активной сессии) между ним и абонентом и абонентом Б передается поток пакетов, производимый кодеками (оконечными устройствами абонентов). В зависимости от типа применяемого кодека свойства этого потока могут отличаться.

В данной работе будем полагать, что применяется кодек G.711 (один из возможных вариантов данного кодека) который производит регулярный поток пакетов с интенсивностью  $a_0=20$  пакетов/с, размер каждого пакета равен  $L=200$  байт (с учетом заголовка). Таким образом, трафик пользователя может быть описан случайным потоком вызовов (сессий), начало каждой из сессий «запускает» регулярный поток пакетов, который продолжается в течении всей сессии (на протяжении разговора). Завершение сессии (отбой) завершает регулярный поток пакетов, и т.д. Так может быть описан трафик одного абонента. Трафик в сети может быть получен объединением (агрегированием) нескольких таких потоков.

Пусть количество абонентов равно  $n$ , а интенсивность удельной абонентской нагрузки  $y_0$  Эрл, то интенсивность нагрузки, производимой группой абонентов будет равна  $y=ny_0$  Эрл.

Величина интенсивности нагрузки, производимой группой абонентов  $y$  равна среднему количеству активных сессий (разговоров). Однако, в каждый конкретный момент времени это количество может быть больше или меньше среднего значения. Если параметры сети требуется рассчитать так, чтобы она обслуживала трафик с гарантированным качеством, то следует задать вероятность  $p_0$ , того, что этот уровень будет обеспечен. Зная  $p_0$  и  $y$  можно найти количество потоков (активных сессий) на которые требуется рассчитывать сеть.

Полагая, что поток вызовов можно описать моделью простейшего потока, количество активных сессий можно найти, воспользовавшись первой формулой Эрланга

$$p(y, v) = \frac{y^v}{v!} \frac{v!}{\sum_{k=0}^v \frac{y^k}{k!}}$$

Количество потоков  $v$  может быть найдено как

$$v = \arg \min_v |p(y, v) - p_0| \text{ (потоков)}$$

Интенсивность трафика пакетов может быть определена как

$$\lambda = v a_0 \text{ .пакетов/с,}$$

а интенсивность трафика

$$a = 8\lambda L \text{ бит/с,}$$

Целью данной работы является моделирование потока трафика от группы пользователей услуг VoIP и исследование его свойств.

## 2. Построение имитационной модели

Для построения имитационной модели трафика группы пользователей VoIP создадим, сначала, модель трафика одного пользователя. При создании модели воспользуемся принципом построения on/off модели.

Создадим типы агентов (Java классы в старой версии) «Packet» и «VoIPSubs» (рисунок 1) в типе «Packet» создадим два параметра: origTime и length.

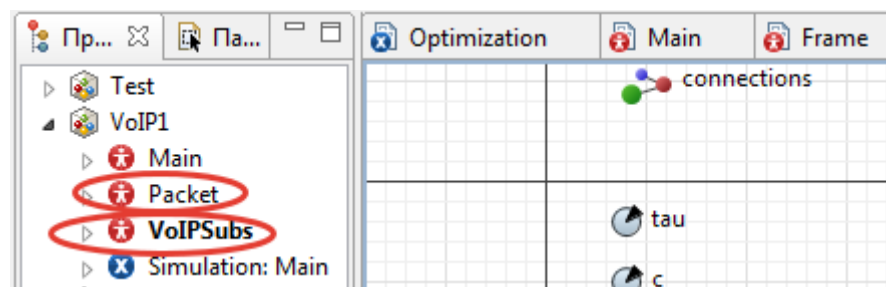


Рисунок 1 – Создаваемые типы агентов

Содержимое типа «VoIPSubs» приведено на рисунке 2. Он и будет являться моделью VoIP пользователя.

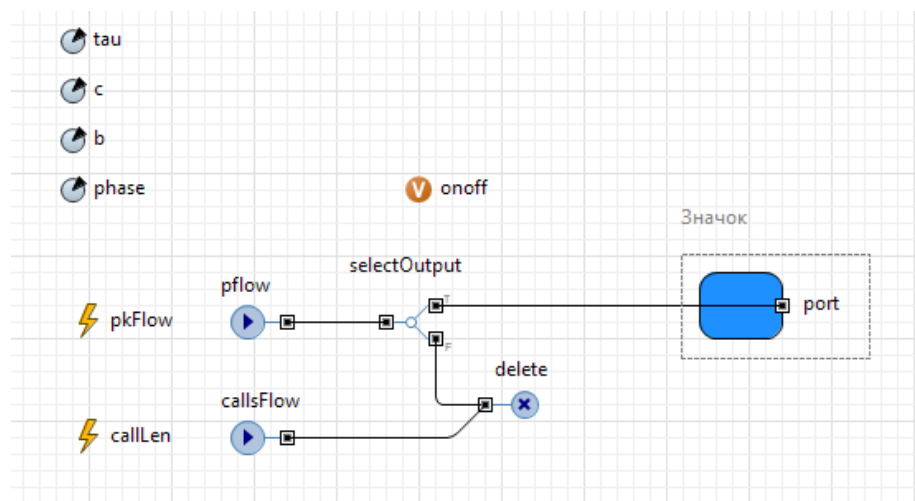


Рисунок 2 – Модель абонента VoIP

Основные элементы:

Источник «callsFlow» - имитирует поток телефонных вызовов, его свойства приведены на рисунке 3.

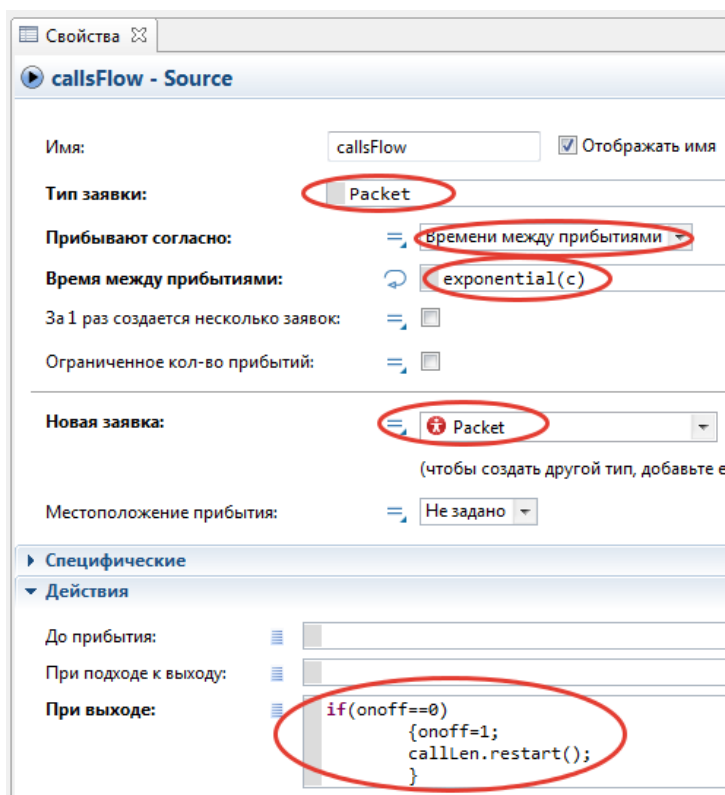


Рисунок 3 – Свойства «callsFlow»

Заявки вырабатываемые источником «callsFlow» в модели не используются, а сразу направляются в элемент «sink», его роль состоит в том,

что в момент выхода очередной заявки значение переменной «onoff» устанавливается равным «1» и вызывается метод «callLen.restart()» который запускает таймер «callLen», отмеряющий (имитирующий) время разговора. Это время выбирается случайным, имеющим экспоненциальное распределение со средней продолжительностью разговора. Это определено в свойствах элемента «callLen», рисунок 4.

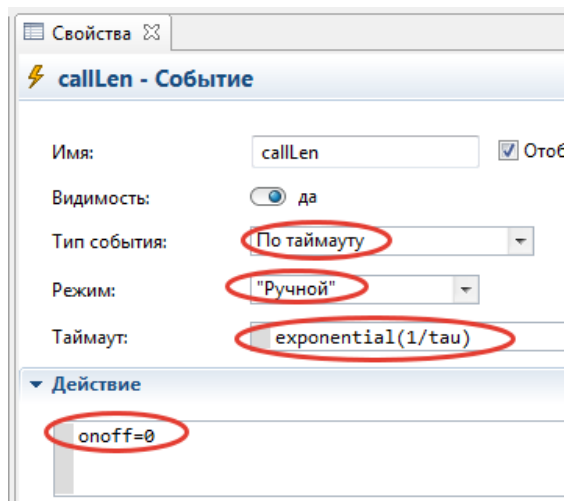


Рисунок 3 – Свойства «callLen»

По истечении таймаута (времени разговора) данный элемент выполняет единственное действие – устанавливает значение переменной «onoff» равным «0».

Источник «pflow» служит для имитации потока пакетов, его свойства приведены на рисунке 4.

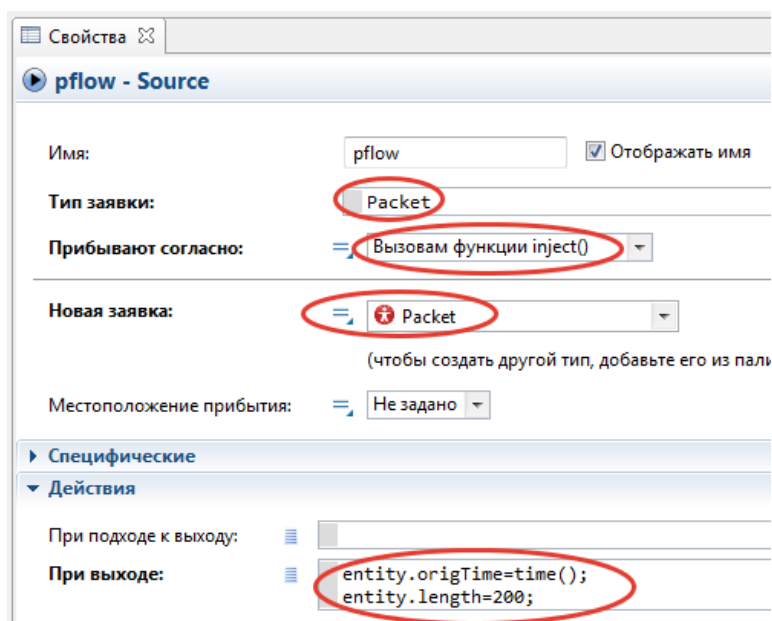


Рисунок 4 – Свойства «pflow»

Источник работает в «ручном» режиме, заявка вырабатывается при вызове функции inject(). Эта функция вызывается при срабатывании таймера, реализованного на элементе «pkFlow». Данный таймер срабатывает циклически с периодом b. Время первого срабатывания таймера случайно со средним значением «phase». Свойства элемента приведены на рисунке 5.

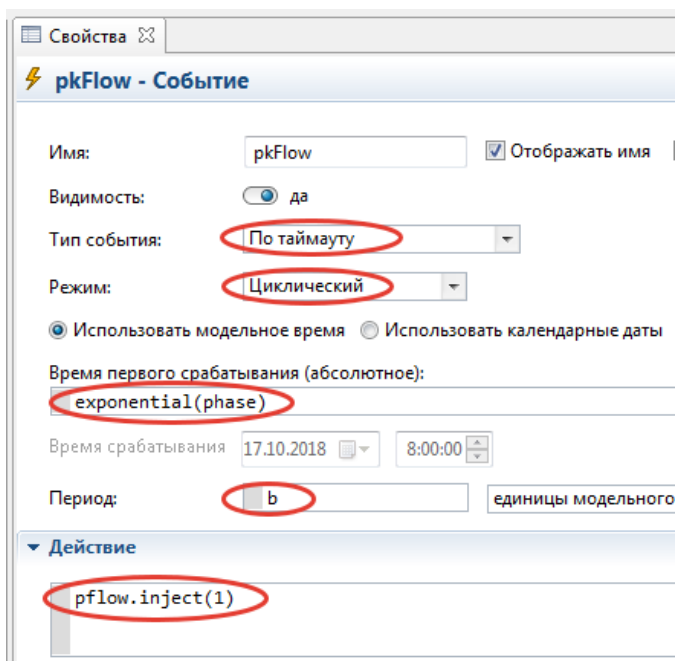


Рисунок 5 – Свойства «pkFlow»

Элемент «selectOutput» направляет заявки, вырабатываемые источником «pflow» по условию onoff==1 на выход «Т» и далее на выходной порт, рисунок 6.

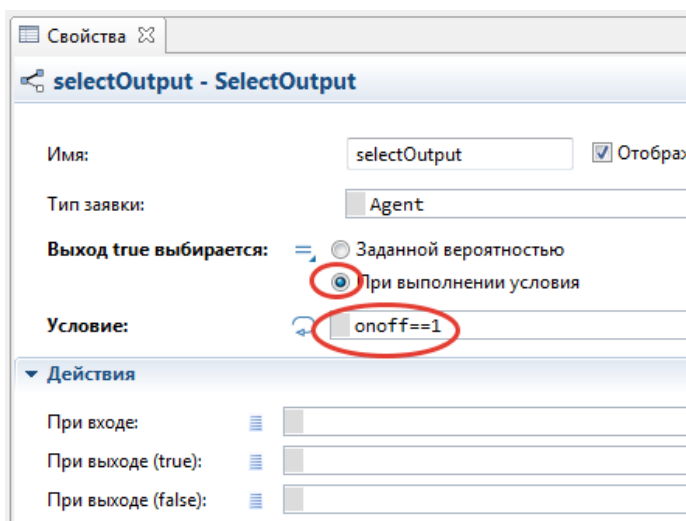


Рисунок 6 – Свойства «selectOutput»

Структура модели приведена на рисунке 7. Основным элементом модели является элемент «vrIPSubs», в свойствах которого он определен как популяция агентов (группа пользователей), рисунок 8.

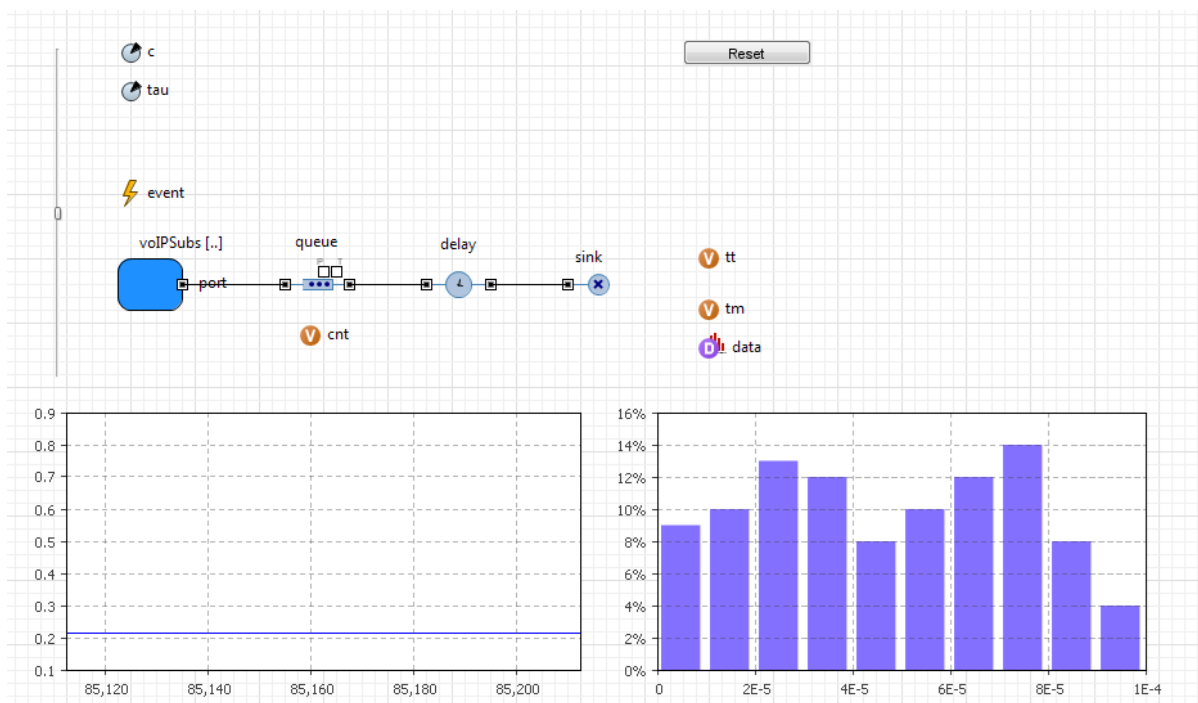


Рисунок 7 – Структура модели

The figure shows a 'Свойства' (Properties) window for the 'voIPSubs - VoIPSubs' agent population. The window has a title bar with a list icon and a close icon. Below the title bar, there is a section for 'Имя' (Name) with the value 'voIPSubs' and a checked box for 'Отображать имя' (Show name). There are two radio buttons for agent type: 'Одиночный агент' (Single agent) and 'Популяция агентов' (Agent population), with the latter selected. Below this is a field for 'Начальное количество агентов' (Initial number of agents) with the value '1000'. At the bottom, there are four parameter settings: 'c' = 'c', 'tau' = '60', 'b' = '0.02', and 'phase' = '1'. Each of these parameter values is circled in red.

Рисунок 8 – Свойства «vrIPSubs»

Примерный результат моделирования трафика приведен на рисунке 9.

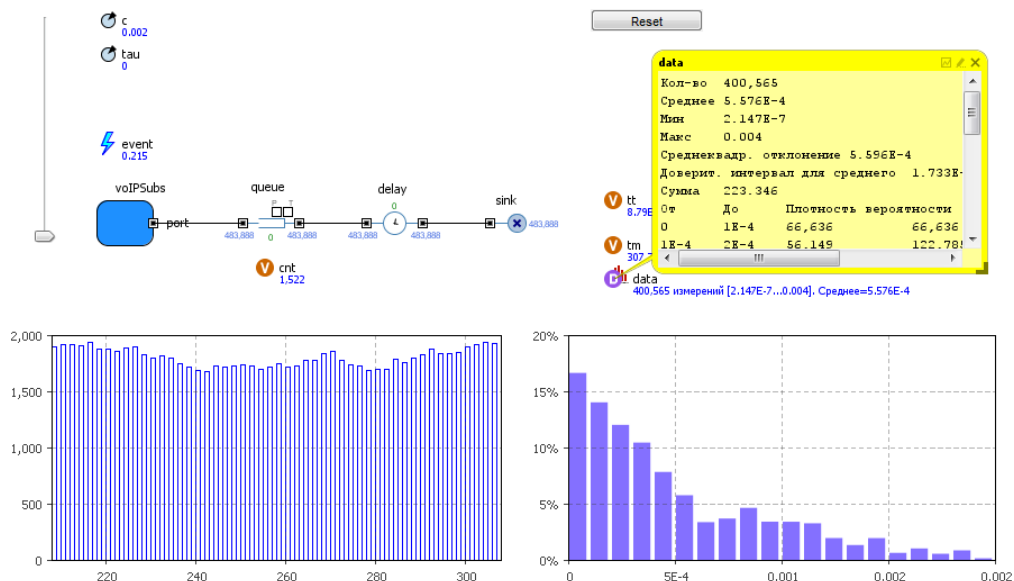


Рисунок 8 – Результат моделирования трафика

### 3. Анализ свойств трафика

Провести серию экспериментов и оценить свойства трафика. Для исследования свойств можно использовать гистограмму, интенсивность нагрузки (эрл), интенсивность трафика (бит/с) и значения коэффициента вариации для интервала между пакетами (отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению). Произведите анализ этих свойств от количества пользователей (абонентов). Результаты моделирования занесите в таблицу 1.

Таблица 1 - Зависимость свойств трафика от количества пользователей

Кол-во польз	Интенсивность нагрузки Эрл	Средняя интенсивность трафика бит/с	Максимальная интенсивность трафика бит/с	Максимальное количество потоков	Коэффициент вариации
1					
5					
10					
50					
100					
200					
300					
500					
7000					
1000					

По данным таблицы 1 построить графики зависимости коэффициента вариации от количества пользователей.

### **3. Выводы по работе**

Сформулировать выводы по каждому из этапов выполнения работы:

1. По построению имитационной модели канала с коллизиями.
2. По результатам имитационного и аналитического моделирования VoIP трафика.
3. По результатам моделирования потока.

### **4. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и краткое описание проводимых исследований
2. Результаты проверки функционирования модели.
3. Таблицу с результатами экспериментов (Таблица 1) и соответствующие графики.
4. Выводы по полученным в работе результатам.