

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Методические указания

**к выполнению контрольных работ
«Моделирование систем на базе сетей с очередями»
для студентов специальности АСОИ заочной формы обучения**

БРЕСТ 2018

УДК 681.3 (075.8)
ББК с57

Целью методических указаний является информационное и методическое обеспечение контрольных работ по дисциплинам “Моделирование систем”, “Моделирование”, связанных с имитационным и аналитическим моделированием систем на базе сетей с очередями.

Составители: Муравьев Г.Л., доцент, к.т.н.;
Мухов С.В., доцент, к.т.н.;
Савицкий Ю.В., доцент, к.т.н.

Рецензент: Козинский А.А., доцент, к.т.н. кафедры информатики и прикладной математики Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина

1. ВВЕДЕНИЕ

Пусть требуется промоделировать систему. Это означает, что требуется разработать модели системы, а затем использовать их для оценки и прогнозирования ее характеристик. Здесь в качестве математических моделей используются сети с очередями. Типовая система состоит из частей – узлов, обеспечивающих обслуживание потоков запросов (заявок) и управление процессами обслуживания и перемещением запросов в системе. Роль узлов могут, например, выполнять устройства компьютера, а роль заявок – решаемые задачи, информационные запросы. Можно выделить такие типизированные узлы, как устройства и памяти, обладающие ограниченными ресурсами, которые предоставляются запросам при обслуживании.

Узлы типа “устройство” имеют одинаковые каналы. Каждый канал обслуживает один запрос, а запрос может занимать любой свободный канал. Соответственно обслуживание запроса включает: – занятие свободного канала (фаза захвата); – обслуживание в канале (фаза задержки в канале на время обслуживания); – освобождение канала. При отсутствии свободного канала запрос ожидает его появления (освобождения).

Узлы типа “память” обладают емкостью, которая может быть выделена запросу (фаза выделения) или освобождена (фаза освобождения). Запрос, получивший необходимое место в памяти, незамедлительно отправляется далее по своему маршруту, а при его отсутствии ожидает освобождения памяти.

Запросы поступают извне, образуя входные потоки. Система организует процессы обслуживания в соответствии со своим законом функционирования, и на ее выходе образуются выходные потоки. В общем случае все процессы в системе, а следовательно и функционирование системы в целом, носят вероятностный характер. Потоки запросов описываются законами поступления, маршрутами движения, законами обслуживания. Закон поступления задается распределением времени между соседними заявками в потоке. Законы обслуживания запросов задаются распределениями трудоемкостей их обслуживания в узлах системы. Так, закон обслуживания запросов в устройстве задается распределением трудоемкости обслуживания в канале или соответствующего времени обслуживания. Маршруты движения запросов задаются матрицами переходов P .

2. ПРИМЕР СИСТЕМЫ

Ниже приведен пример системы (далее по тексту – СИСТЕМА), используемый далее для иллюстрации выполнения работы. Состоит из одноканального устройства b_1 , многоканального устройства b_2 . Внешняя среда представлена источником (узел b_0), приемником обслуженных запросов (узел b_3). Законы поступления и обслуживания запросов – экспоненциальные (т. е. время между соседними запросами во входном потоке и время обслуживания запроса в канале каждого узла есть случайная величина, распределенная экспоненциально). Порядок движения запросов представлен матрицей P , где элемент $p(i,j)$ задает вероятность движения запроса с выхода i -го узла на вход в j -й (таблица 1). Сумма элементов каждой строки – единица. Параметры системы приведены в таблице 2, где m_T (τ_{in}) – среднее время между запросами во входном потоке; K – число каналов устройства; m_t – среднее время обслуживания запроса в канале.

Экспоненциальное распределение задается параметром λ ($\lambda > 0$) или $m = 1 / \lambda$. Здесь m можно рассматривать как среднее время между событиями в потоке событий, тогда λ интерпретируется как интенсивность потока событий. В СИСТЕМЕ для входного потока задано $m = m_r = 20$ единиц времени, следовательно, скорость поступления запросов составит $\lambda = \lambda_0 = 0,05$ запросов в единицу времени. Заданы также средние времена обслуживания. Например, для первого устройства $m = m_t = 4$ единицы времени. Тогда $\lambda = \mu = 1 / m_t$ даст скорость обслуживания запросов в канале устройства.

Таблица 1 – Матрица переходов P

	b_0	b_1	b_2	b_3
b_0	0	1	0	0
b_1	0	0	1	0
b_2	0	0	0,5	0,5
b_3	0	0	0	1

Таблица 2 – Параметры СИСТЕМЫ

№ вар.	потоки		устройства					
	№	m_r	№	K	m_t	№	K	m_t
1	1	20,0	1	1	4,0	2	4	24,0

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ

Сначала разрабатывается концептуальная модель (КМ), затем математические модели (ММ), затем они реализуются, например, как имитационные (ИМ) или аналитические модели (АМ) и используются для анализа системы. Построение КМ начинается с анализа параметров системы и решаемых задач. Предполагает: – формулирование целей моделирования; – описание параметров системы (параметров структуры системы и процессов, протекающих в ней); – описание искомым характеристик и способов их вычисления; – анализ возможности использования типовых ММ; – выбор средств реализации ММ. Здесь в качестве типовых ММ используется подмножество Q-схем – стохастические сетевые модели (ССМ) и сети массового обслуживания (СеМО). Построение моделей в терминах ССМ, СеМО предполагает разработку схемы модели на базе типового набора узлов, который представлен рисунком 1. Соответствующая схема математической модели СИСТЕМЫ иллюстрируется рисунком 2.

Набор узлов включает: а – одиночный источник интенсивности λ_0 , создающий поток с заданным распределением времени t (тау) между соседними заявками; б – групповой источник, поставляющий сначала в сеть “пачку” из M_0 заявок. Далее при появлении на его входе заявки, уже обслуженной в системе, направляет в систему взамен новую заявку, поддерживая тем самым их постоянное число M_0 в системе; в – источник запросов, поставляющий в сеть “пачку” из M_0 заявок (используется аналогично групповому в GPSS-моделях); г – узел приемник; ж, з – одноканальное устройство, изображаемое одним блоком или в виде узлов-фаз (захват канала, задержка на длительность обслуживания, освобождение канала); и – многоканальное устройство, изображаемое одним блоком с показом или без самих каналов; к – узлы-фазы использования памяти (узел захвата емкости памяти, узел освобождения); л - многоканальное устройство, изображаемое в

виде узлов-фаз (захват, задержка, освобождение); m – вероятностный маршрутный узел (тип P), “разыгрывающий” дальнейший маршрут движения заявки в соответствии с заданными вероятностями выбора маршрутов.

Для описания разомкнутой ССМ и ее моделирования в GPSS (рисунок 1, д) необходимо для каждого потока заявок использовать одиночный источник заявок (на рисунке узел b_0) и приемник (на рисунке – b_0). Для описания замкнутого режима работы ССМ (рисунок 1, е) необходимо в исходной сети (рисунок 1, д) для каждого потока заявок: – убрать приемник; – заменить одиночный источник заявок групповым (на рисунке это узел b_k); – выход системы завести на вход источника (показано пунктирной линией). При описании модели могут вводиться новые узлы (узлы-фазы их использования). Для их обозначения используется сквозная нумерация с учетом принадлежности узла к управлению одними и теми же ресурсами. Например, узлы-фазы управления устройством k именуются как $b_{k,1}$, $b_{k,2}$, $b_{k,3}$ и т.д.

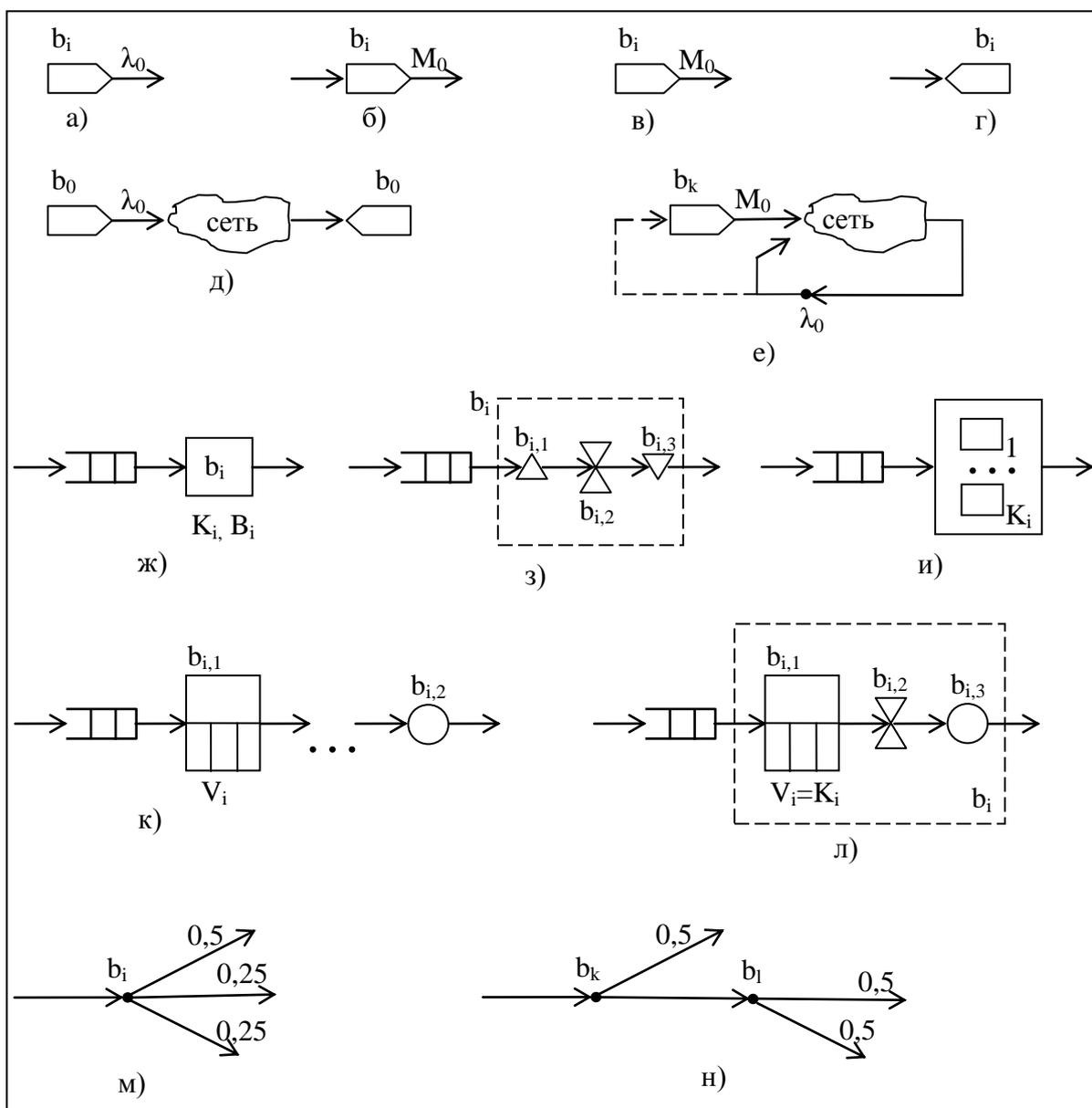
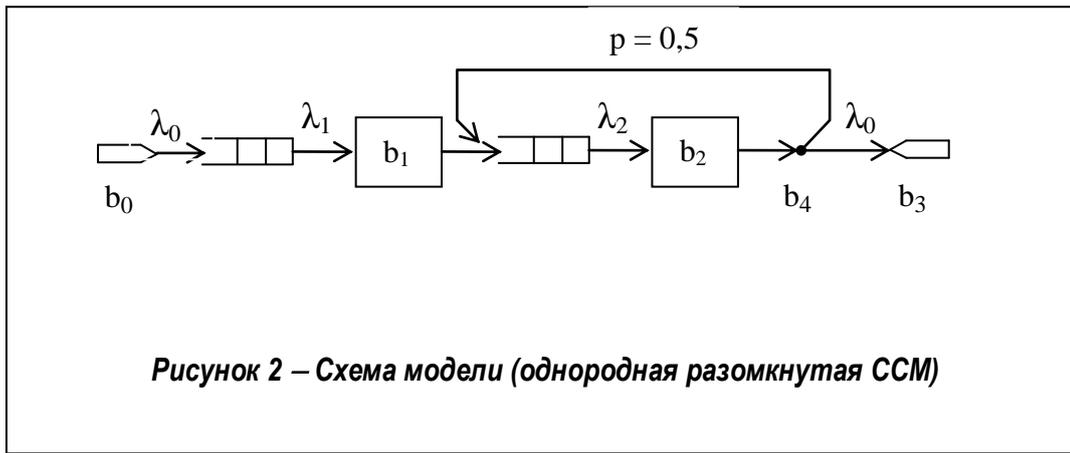


Рисунок 1 – Типовые узлы ССМ



3.1. Построение схемы модели

Схема изображается графом: графические символы (рисунок 1) представляют узлы системы; направленные дуги представляют возможные направления перемещения запросов в процессе обслуживания в системе. Альтернативным дугам ставятся в соответствие условия перехода, задаваемые вероятностями. Для СИСТЕМЫ анализируем матрицу P , начиная со строки узла-источника b_0 . По матрице определяем, что каждый запрос переходит от b_0 с вероятностью 1 к узлу b_1 . Затем анализируем строку матрицы узла b_1 и определяем, что с вероятностью единица запрос переходит от b_1 к узлу b_2 и т. д., пока не опишем весь маршрут. Так как после выхода из узла b_2 дальнейший маршрут заявки определяется вероятностным выбором из двух альтернатив, то дополнительно вводится маршрутный узел b_4 , “разыгрывающий” для каждой пришедшей заявки маршрут в соответствии с заданными вероятностями. Тогда состав узлов модели: b_0 – одиночный источник запросов; b_1 – одноканальное устройство; b_2 – четырехканальное устройство; b_4 – маршрутный, вероятностный узел; b_3 – приемник запросов. Полученные результаты изображаем в виде схемы (рисунок 2). Матрица переходов с учетом новых узлов представлена таблицей 3.

Таблица 3 – Матрица переходов

	b_0	b_1	b_2	b_4	b_3
b_0		1			
b_1			1		
b_2				1	
b_4			0,5		0,5
b_3					1

3.2. Описание параметров потока запросов и узлов

Для потока запросов описываются векторы \vec{h}_0 и $\{ \vec{h}_j \}$ параметров закона поступления запросов в систему и параметров обслуживания запросов в каждом j -м узле системы соответственно. Узлы задаются векторами $\{ \vec{z}_j \}$. Для СИСТЕМЫ параметры приведены в таблицах 4 и 5. Здесь параметры обслуживания запросов в устройствах b_1 и b_2 заданы векторами \vec{h}_1 , \vec{h}_2 , а параметры узлов векторами \vec{z}_0 , \vec{z}_1 , \vec{z}_2 , \vec{z}_4 .

Таблица 4 – Параметры узлов

Узел	Параметр	Описание параметра	Значение
b ₀	z _{0,1}	тип узла	источник (одиночный)
	z _{0,2}	назначение	генерация потока заявок
b ₁	z _{1,1}	тип узла	устройство
	z _{1,2}	канальность K ₁	1
b ₂	z _{2,1}	тип узла	устройство
	z _{2,2}	канальность K ₂	4
b ₄	z _{4,1}	тип узла	маршрутный
	z _{4,2}	назначение	вероятностный выбор маршрута

Таблица 5 – Параметры потока запросов

Параметр	Описание параметра	Значение
h _{0,1}	закон (функция плотности) f _t распределения времени t между заявками в потоке	случайный
h _{0,2}	тип закона	экспоненциальный
h _{0,3}	среднее время t - m _t	20
	примечание: интенсивность поступления заявок $\lambda = 1 / m_t = 0,05$	
h _{1,1}	закон распределения (функция плотности) f _{t,1} времени t обслуживания в канале b ₁	случайный
h _{1,2}	тип закона	экспоненциальный
h _{1,3}	среднее время m _t обслуживания в канале b ₁	4
h _{2,1}	закон распределения (функция плотности) f _{t,2} времени t обслуживания в канале b ₂	случайный
h _{2,2}	тип закона	экспоненциальный
h _{2,3}	среднее время m _t обслуживания в канале b ₂	24

3.3. Описание характеристик

Для СИСТЕМЫ характеристики, рассчитываемые на модели, представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 – Узловые характеристики

Узел	Характеристика	Описание
b ₁	ρ_1	коэффициент загрузки узла
	l ₁	средняя длина очереди
	m ₁	среднее число запросов в узле, включая очередь
	ω_1	среднее время ожидания в очереди
	u ₁	среднее время пребывания в узле, включая ожидание
b ₂	α_1	коэффициент передач – число посещений узла запросом
	ρ_2	коэффициент загрузки узла

Таблица 7 – Системные характеристики

Характеристика	Описание	Вычисление
L	средняя суммарная длина очередей	$L = l_1 + l_2$
M	среднее суммарное число запросов в системе	$M = m_1 + m_2$
W	среднее время ожидания запроса в системе	$W = \omega_1 \cdot \alpha_1 + \omega_2 \cdot \alpha_2$
U	среднее время пребывания запроса в системе	$U = u_1 \cdot \alpha_1 + u_2 \cdot \alpha_2$

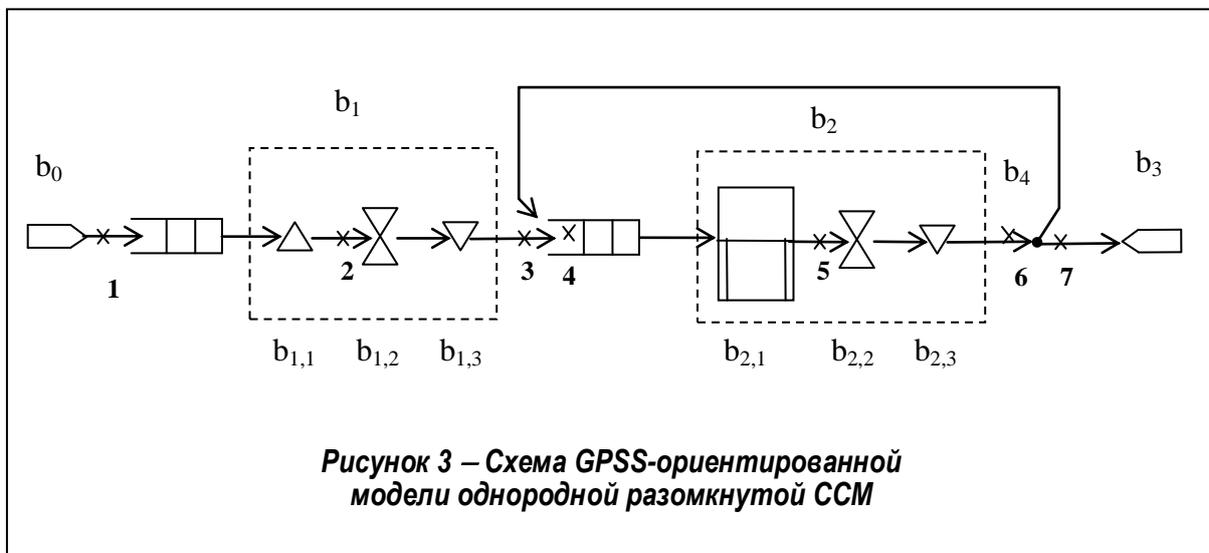
4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Здесь означает построение ММ, реализуемой и рассчитываемой имитационно в системе моделирования GPSS World. Для этого ранее разработанную модель надо модифицировать с учетом особенностей языка GPSS, а затем описать на входном языке системы GPSS. Результат – имитационная GPSS-модель (GPSS-ориентированная ССМ). Справочная информация по GPSS World и языку GPSS приведена в Приложениях.

Так как часть узлов ССМ не поддерживается GPSS напрямую, то есть особенности применения изобразительных возможностей GPSS для отображения ССМ. Они изложены ниже в виде соответствующих правил (иллюстрируются рисунком 1): 1. При моделировании разомкнутой ССМ (рисунок 1, д) в замкнутом режиме (рисунок 1, е) необходимо для каждого потока заявок: – убрать приемник; – заменить одиночный источник заявок групповым источником без входа (узел bk); – выход системы завести на ее вход (показано сплошной линией). 2. Одноканальное устройство представляется в виде соответствующих узлов-фаз (рисунок 1, з). 3. Многоканальное устройство представляется на базе узла типа “память” (емкость памяти здесь равна числу каналов K устройства) в виде узлов-фаз, отображающих захват единицы памяти (канала), задержки на время обслуживания и освобождение единицы памяти (канала) (рисунок 1, л). 4. Вероятностные маршрутные узлы ССМ (узлы типа Р) с произвольным числом альтернативных маршрутов (на рисунке 1, м это узел с тремя маршрутами) следует заменить набором аналогичных маршрутных узлов с двумя альтернативными маршрутами каждый (рисунок 1, н), пересчитав соответствующим образом вероятности выбора маршрутов.

4.1. Построение схемы GPSS-ориентированной модели

Для СИСТЕМЫ можно получить GPSS-ориентированную ССМ, применяя указанные выше правила (здесь № 2-4) к исходной ССМ, представленной на рисунке 2. Узел b_2 сети в соответствии с исходными данными должен быть 4-канальным. Схема соответствующей GPSS-модели приведена на рисунке 3.



4.2. Организация сбора статистики

Для сбора в ходе моделирования данных, необходимых для расчета статистических оценок характеристик системы, необходимо в модели определить точки их сбора. Это

пары точек (контрольных точек) $\{ (x_k, y_k) \}$. Здесь x_k – первая, а y_k – вторая точка схемы ССМ, в которых фиксируются данные по каждой заявке, включая время прохождения указанных точек. По ним рассчитывается, в частности, среднее время пребывания заявок в каждом фрагменте сети, заключенном между контрольными точками. В GPSS каждой паре точек соответствует идентификатор, формируемый по правилам имен GPSS (см. Приложения 1, 2). Будем называть его **ИмяПарыТочек**. Это может быть натуральное число, строковый идентификатор. Место размещения первой точки пары определяется местом размещения в модели оператора **queue ИмяПарыТочек**, а место второй точки пары определяется местом размещения оператора **depart ИмяПарыТочек**.

Для СИСТЕМЫ точки сбора данных указаны в таблице 8.

Таблица 8 – Измерение узловых характеристик

Узел	Характеристика	Точки или узел замера	ИмяПарыТочек
b ₁	l_1, ω_1	1-2	w_b_1
	m_1, u_1	1-3	u_b_1
	ρ_1	узел b ₁	-
b ₂	l_2, ω_2	4-5	w_b_2
	m_2, u_2	4-6	u_b_2
	ρ_2	узел b ₂	-

Точки измерения данных для вычисления системных характеристик, а также формулы для их расчета через узловых характеристики, приведены в таблице 9. При этом на схеме сами точки сбора статистики обозначены символом “x” или “v”.

Таблица 9 – Измерение и вычисление системных характеристик

Характеристика	Вычисление	Точки (узел замера)	ИмяПарыТочек
L	$L = l_1 + l_2,$	1-2 плюс 4-5	-
W	$W = \omega_1 \cdot \alpha_1 + \omega_2 \cdot \alpha_2$		
M	$M = m_1 + m_2,$	1-7	U_system
U	$U = u_1 \cdot \alpha_1 + u_2 \cdot \alpha_2$		

4.3. Построение GPSS-модели

Здесь означает расчет построенной ранее ММ (здесь СеМО) средствами GPSS World (см. Приложения). Для СИСТЕМЫ требуется описать на языке GPSS сеть, представленную на рисунке 3. Для отображения многоканального узла использован блок GPSS типа STORAGE, обладающий емкостью. Емкость берется равной числу каналов (здесь $K = 4$) и объявляется как **b_2 STORAGE 4**. Заявка захватывает единицу емкости (один канал) оператором **ENTER b_2**, длительность обслуживания задается как **ADVANCE (Exponential(3,0,24))**, а освобождение единицы емкости (канала) производится оператором **LEAVE b_2**. Текст модели СИСТЕМЫ представлен ниже:

```

b_2    STORAGE    4
        GENERATE  (Exponential(1,0,20))
        SEIZE     b_1
        ADVANCE   (Exponential(2,0,4))
        RELEASE   b_1
Label_1 ENTER     b_2
        ADVANCE   (Exponential(3,0,24))
        LEAVE     b_2
        TRANSFER  .5,,Label_1
        TERMINATE 1

```

Полный текст модели СИСТЕМЫ с контрольными точками представлен ниже:

```

b_2      STORAGE      4
         GENERATE     (Exponential(1,0,20))
         queue        U_system
         queue        w_b_1
         queue        u_b_1
         SEIZE        b_1
         depart       w_b_1
         ADVANCE      (Exponential(2,0,4))
         RELEASE      b_1
         depart       u_b_1
         queue        u_sum_b_2
Label_1  queue        w_b_2
         queue        u_b_2
         ENTER        b_2
         depart       w_b_2
         ADVANCE      (Exponential(3,0,24))
         LEAVE        b_2
         depart       u_b_2
         TRANSFER     .5,Label_1
         depart       u_sum_b_2
         depart       U_system
         TERMINATE    1
    
```

В тексте модели обслуживающий узел – одноканальное устройство, обозначен как b_1 , а обслуживающий узел – многоканальное устройство, обозначен как b_2 . Для сбора статистики в тексте модели расставлены контрольные точки, которые обозначены как w_{b_1} и т. д., с помощью пар операторов queue-depart. Это следующие точки (включая и дополнительные для получения суммарных узловых характеристик b_2 - рисунок 3): - queue U_{system} и depart U_{system} для получения системных характеристик типа M, U (точки 1-7); - queue w_{b_1} и depart w_{b_1} для получения узловых характеристик b_1 типа ω_1, l_1 (точки 1-2); - queue w_{b_2} и depart w_{b_2} для получения узловых характеристик b_2 типа ω_2, l_2 (точки 4-5); - queue $u_{sum_b_2}$ и depart $u_{sum_b_2}$ для получения суммарных узловых характеристик b_2 типа $\alpha_2 * u_2$ (точки 3-7).

4.4. Имитация системы

Ниже представлен фрагмент отчета по результатам моделирования СИСТЕМЫ, автоматически сформированный GPSS. Так в секции отчета FACILITY (устройства) приведены характеристики работы каждого из устройств. Для СИСТЕМЫ это характеристики устройства (FACILITY) B_1 : – число обслуженных заявок ENTRIES; – коэффициент загрузки канала UTIL.; – средняя длительность обслуживания в канале AVE. TIME и др.

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
B_1	50003	0.200	3.997	1	0	0	0	0	0

В секции отчета STORAGE (памяти) приведены характеристики работы каждой памяти. Для СИСТЕМЫ это характеристики памяти (STORAGE) B_2 , используемой для

моделирования одноименного многоканального устройства: – число обслуженных заявок ENTRIES; – коэффициент загрузки узла UTIL.; – среднее число заявок в узле AVE.C и др.

```
STORAGE      CAP. REM. MIN. MAX.  ENTRIES AVL.  AVE.C. UTIL. RETRY DELAY
  B_2         4   1   0   4   99895  1   2.397 0.599   0   0
```

В секции отчета QUEUE (контрольные точки) приведены характеристики, вычисленные в контрольных точках (в соответствии с парами операторов queue-depart). Здесь это характеристики контрольных точек U_SYSTEM, W_B_1, U_SUM_B_2, W_B_2 и др.: – число ENTRY прошедших через фрагмент заявок; – среднее количество AVE.CONT. заявок, находящихся между контрольными точками; – среднее время AVE.TIME пребывания заявок между точками и другие характеристики.

```
QUEUE      MAX CONT. ENTRY ENTRY (0) AVE.CONT. AVE.TIME  AVE. (-0) RETRY
U_SYSTEM   20   3  50003     0   3.053   61.076   61.076   0
W_B_1      7    0  50003  39850   0.051    1.030    5.072   0
U_B_1      8    0  50003     0   0.251    5.027    5.027   0
U_SUM_B_2  20   3  50003     0   2.802   56.050   56.050   0
W_B_2     17   0  99895  71753   0.405    4.059   14.409   0
U_B_2     20   3  99895     0   2.802   28.056   28.056   0
```

Ниже в таблице 10 представлены результаты имитационного моделирования СИСТЕМЫ: трех прогонов с разной длительностью – в 10000, 50000, 100000 обслуженных заявок. Для прогона 2 вычислена величина отклонения каждой характеристики по отношению к значениям предыдущего прогона 1, соответственно значения прогона 3 сравниваются с значениями прогона 2. Отклонения вычисляются в виде относительной погрешности - характеристики предыдущего прогона берутся при этом за 100%.

Таблица 10 – Результаты имитационного моделирования

	Характеристика	Значения характеристик			Отклонение, %	
		ИМ (10000)	ИМ (50000)	ИМ (100000)	1	2
Узел						
1	ρ_1	0,201	0,2	0,2	-0,5	0
	l_1	0,053	0,051	0,05	-3,7	-2
	m_1	0,254	0,251	0,25	-1,2	-0,4
	ω_1	1,067	1,03	1,03	-3,5	0
	u_1	5,067	5,03	5,03	0,7	0
2	ρ_2	0,601	0,599	0,6	-0,33	-0,17
	l_2	0,424	0,405	0,43	-4,5	6
	m_2	2,828	2,801	2,83	-1	1
	ω_2	4,27	4,059	4,31	-4,9	6
	u_2	28,27	28,059	28,31	-0,74	0,89
Система						
	L	0,477	0,456	0,48	-4,4	5
	M	3,082	3,053	3,076	-0,94	0,75
	U	62,1	61,08	61,73	-1,6	1,06
	W	9,607	9,148	9,65	-4,8	5,4

4.5. Анализ исходного состояния системы

В работе систем рассматриваемого вида можно выделить два характерных режима функционирования: стационарный и нестационарный. То, в каком режиме находится система, может зависеть от характера ее нагрузки - от интенсивностей поступающих на обслуживание заявок, от их числа в системе для замкнутого режима работы. Стационарный, устойчивый режим - когда система не исчерпала своих ресурсов. Здесь коэффициенты загрузки узлов меньше единицы. При увеличении длительности моделирования (росте числа обработанных запросов) характерно существование статистически устойчивых значений характеристик (длин очередей и т. д.). Нестационарный, не устойчивый режим - когда система (узел) исчерпала свои ресурсы. Здесь коэффициенты загрузки узлов (хотя бы одного) принимают значения близкие (равные) единице. При увеличении длительности моделирования значения характеристик существенно меняются (длины очередей, например, имеют тенденцию к нарастанию).

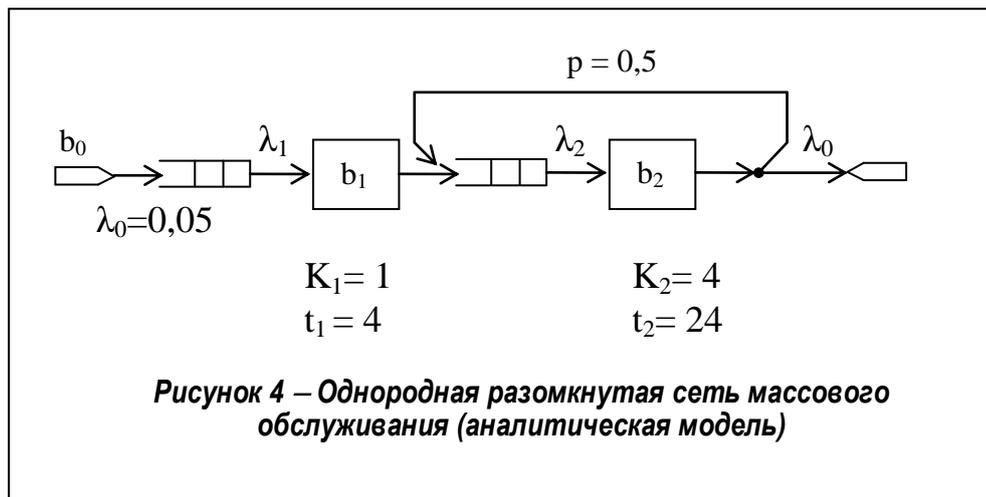
Таким образом, существенный и устойчивый рост отклонений значений характеристик при увеличении длительности моделирования свидетельствует или об ошибках в описании модели, организации сбора статистических данных либо о нестационарном функционировании системы. В последнем случае надо обратить внимание на значения коэффициентов загрузки каналов узлов. При выявлении нестационарно работающей системы следует согласовать дальнейшие действия с преподавателем!

В стационарном режиме степень сбалансированности системы может быть оценена сравнением коэффициентов загрузки ее узлов. Идеальная балансировка наблюдается, когда $\rho_1 = \rho_2 = \dots$. Если система разбалансирована, то она требует настройки, модификации. Узел или узлы с наибольшими значениями коэффициентов загрузки – потенциально “узкие” места системы. При росте нагрузки они первыми войдут в режим насыщения и могут достичь загрузки близкой к полной, что нарушит стационарность работы системы. Сеть перейдет из устойчивого стационарного режима в режим насыщения. В ней возникнет тенденция к бесконечному нарастанию длин очередей с ростом времени наблюдения (моделирования).

Для СИСТЕМЫ выполняем анализ характеристик (таблица 10). Из данных видно, что значения характеристик устойчивы - изменения в их значениях при увеличении длительности моделирования незначительны и имеют тенденцию к уменьшению. Наблюдаемые расхождения можно объяснить их статистической природой и недостаточными объемами данных. Система работает в стационарном режиме, коэффициенты загрузки каналов всех узлов меньше единицы ($\rho_1 = 0,2$; $\rho_2 = 0,6$). Система разбалансирована. Потенциально “узкое” место – узел b_2 .

5. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Здесь в качестве аналитической модели используется разомкнутая, однородная, линейная, экспоненциальная сеть массового обслуживания (сеть МО), имеющая точное формульное решение. Обслуживающие узлы таких сетей представляют собой системы массового обслуживания (СМО) типа М/М/К. Это узлы с К каналами, на вход которых поступает поток заявок с интенсивностью λ . Значения времени t (τ_{ij}) между соседними заявками в потоке распределены по экспоненциальному закону. Среднее значение $m_T = 1 / \lambda$. Так же распределена длительность t обслуживания заявок в каждом канале СМО. Значения λ , К, t являются параметрами СМО, т. е. задаются при ее описании. Структура модели СИСТЕМЫ дана на рисунке 4.



В таких моделях, как правило, внешняя среда (узел-источник запросов b_0 и узел-приемник обслуженных запросов b_3) представляется одним узлом b_0 , поскольку запросы приходят из внешней среды и возвращаются в нее. А в матрице вероятностей переходов P учитывают явно только внешнюю среду и узлы-устройства. Для СИСТЕМЫ это узлы b_0, b_1, b_2 и матрица, приведенная ниже. Параметры модели представлены в таблицах 4, 5, а состав искоемых характеристик в таблицах 6, 7.

Таблица 11 – Матрица переходов P

	b_0	b_1	b_2
b_0	0	1	0
b_1	0	0	1
b_2	0,5	0	0,5

Расчет модели состоит из этапов, представленных ниже.

1. Вычислим значения интенсивностей входного потока λ_j для каждого узла. Для этого построим и решим систему из N линейных уравнений, используя свойство линейности сети, выражаемое для каждого из устройств $i = 1, 2, \dots, N$ как

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j * p_{j,i}.$$

Для СИСТЕМЫ $N = 2$ и искоемые величины: λ_1 и λ_2 . Система уравнений выглядит как

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_0 * p_{0,1} + \lambda_1 * p_{1,1} + \lambda_2 * p_{2,1}; \\ \lambda_2 &= \lambda_0 * p_{0,2} + \lambda_1 * p_{1,2} + \lambda_2 * p_{2,2}. \end{aligned}$$

А после подстановки значений $p_{i,j}$ из матрицы P система уравнений выглядит как

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_0 * 1 + \lambda_1 * 0 + \lambda_2 * 0; \\ \lambda_2 &= \lambda_0 * 0 + \lambda_1 * 1 + \lambda_2 * 0,5. \end{aligned}$$

Соответственно получим значения $\lambda_1 = 0,05, \lambda_2 = 0,1$.

Проверим результаты. Для СИСТЕМЫ используем отчет моделирования. Например, в параграфе 4.4 приведены фрагменты листинга для моделирования 50000 заявок. Из

листинга видно, что число входов для узла b_1 (поле Entries строки Facility для узла b_1) составляет 50003 заявки, а для многоканального узла b_2 (поле Entries строки Storage для узла b_2) составляет 99895 заявок. Общее число заявок, вошедших в систему – 50000 (задано в START) с интенсивностью $\lambda_0 = 0,05$. Из пропорций получаем $\lambda_1 = 0,05$ и $\lambda_2 = 0,1$.

2. Рассчитываем коэффициенты передач – среднее число посещений заявкой каждого устройства за время полного обслуживания как $\alpha_k = \lambda_k / \lambda_0$.

Для СИСТЕМЫ значения коэффициентов передач $\alpha_1 = \lambda_1 / \lambda_0 = 1$, $\alpha_2 = \lambda_2 / \lambda_0 = 2$.

3. Рассчитываем коэффициенты загрузок каналов устройств по формуле

$$\rho_k = \lambda_k * t_k / K_k .$$

Если значения коэффициентов загрузок всех узлов окажутся меньше единицы, то сеть работает в стационарном (устойчивом) режиме и можно продолжать расчеты.

Для СИСТЕМЫ $\rho_1 = 0,2$; $\rho_2 = 0,6$. Система работает в стационарном режиме.

4. Рассчитываем вероятность простоя P_{0j} для каждого узла сети по формуле, где число заявок в узле M_j выполняет роль параметра суммирования

$$P_{0,j} = \left[\sum_{M_j=0}^{K_j-1} \frac{(\rho_j K_j)^{M_j}}{M_j!} + \frac{(\rho_j K_j)^{K_j}}{K_j!(1 - \rho_j)} \right]^{-1} .$$

Для случая $K_j = 1$ формула выглядит как $P_{0j} = (1 - \rho_j) * \rho_j$.

Для СИСТЕМЫ $P_{01} = 0,8$, $P_{02} = 0,083$.

5. Рассчитываем характеристики каждого обслуживающего узла j . Средняя длина очереди определяется как

$$l_j = \frac{(\lambda_j t_j)^{K_j+1}}{K_j! K_j (1 - \lambda_j t_j / K_j)^2} P_{0,j} = \frac{(\rho_j K_j)^{K_j+1} P_{0,j}}{K_j! K_j (1 - \rho_j)^2} = \frac{R_j^{K_j+1} P_{0,j}}{K_j! K_j (1 - \rho_j)^2}$$

Среднее число заявок определяется как

$$m_j = l_j + R_j = \frac{R_j^{K_j+1} P_{0,j}}{K_j! K_j (1 - \rho_j)^2} + \rho_j K_j$$

Значение R_j (среднее число занятых каналов) вычисляется как

$$R_j = \lambda_j t_j = \rho_j K_j$$

Для случая $K_j = 1$ используются формулы

$$l_i = \rho_i^2 / (1 - \rho_i) , \\ m_j = \rho_j / (1 - \rho_j) .$$

Среднее время ожидания и пребывания заявки в узле (время обработки, включая ожидание обслуживания) определяются как $\omega_j = \omega_j / \lambda_j$ и $u_j = m_j / \lambda_j$.

Для СИСТЕМЫ характеристики узла b_1 : $l_1 = 0,05$, $m_1 = 0,25$, $\omega_1 = 1$, $u_1 = 5$; характеристики многоканального узла b_2 : $l_2 = 0,43$, $m_2 = 2,83$, $\omega_2 = 4,3$, $u_2 = 28,3$. Сравните с данными в таблице 10.

6. Рассчитываем системные характеристики. Например, для сети из двух устройств средняя длина очередей $L = l_1 + l_2$; среднее число заявок в сети $M = m_1 + m_2$; среднее

время пребывания заявок в сети $U = \alpha_1 \cdot u_1 + \alpha_2 \cdot u_2$; среднее время ожидания заявок в сети $W = \alpha_1 \cdot \omega_1 + \alpha_2 \cdot \omega_2$.

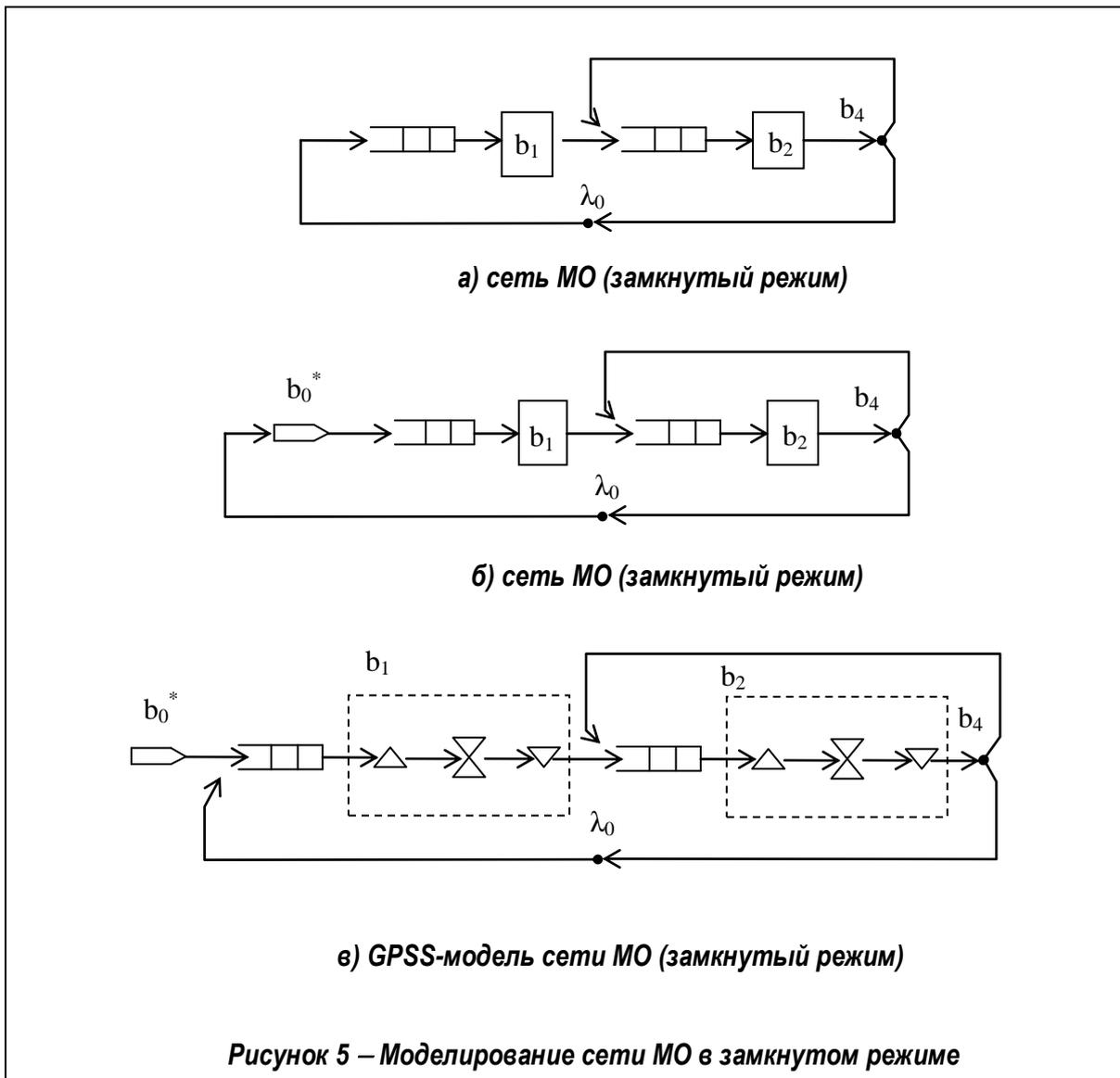
Для СИСТЕМЫ: $L = 0,48$; $M = 3,18$; $U = 61,6$; $W = 9,6$. Сравните с таблицей 10.

7. Вычислим вероятности состояний сети. Для этого опишем множество состояний как $\{\vec{M}\}$, где конкретное состояние задается вектором $\vec{M} = (M_1; \dots; M_N)$ распределения запросов по обслуживающим узлам сети. Здесь M_i – число запросов в узле b_i (на обслуживании в каналах и в очереди на обслуживание). Тогда вероятность состояния сети вычисляется как $P(M_1, M_2, \dots, M_N) = p_{M_1} \cdot p_{M_2} \cdot \dots \cdot p_{M_N}$.

Для СИСТЕМЫ $\vec{M} = (M_1; M_2)$, $P(M_1, M_2) = p_{M_1} \cdot p_{M_2}$. Например, вероятность простоя системы – события $(0; 0)$ вычисляется как $P(0; 0) = p_{01} \cdot p_{02} = 0,8 \cdot 0,083 = 0,067$.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ В ЗАМКНУТОМ РЕЖИМЕ

Часто решаемая задача – оценка предельных характеристик системы (пропускной способности λ_0 , значений U , W , суммарной длины очередей L). Пропускная способность измеряется числом заявок, обрабатываемых системой за единицу времени.



Соответствующие характеристики моделируются аналогично тому, как это делалось в предыдущем разделе, но со следующими изменениями: 1) модель переводится в замкнутый режим работы; 2) вместо изменения интенсивностей потоков заявок производится изменение числа обрабатываемых заявок $M_0 = 1, 2, \dots$ при неизменных значениях остальных параметров; 3) значение пропускной способности λ_0 для заданного M_0 и полученного при моделировании значения U определяется как $\lambda_0(M_0) = M_0 / U$.

Рост числа обрабатываемых заявок приводит к возрастанию загрузки узлов. В предельном случае при значениях коэффициентов загрузки узлов близких единице система начинает работать в режиме “насыщения”. Соответствующее значение $M_0 = M^*$ называется критическим – точкой насыщения системы. Оно делит область работы системы до насыщения ($M_0 < M^*$) и в режиме насыщения ($M_0 > M^*$). Соответственно максимально-достижимое (потенциальное) значение пропускной способности системы $\lambda_0 = \lambda_{0,max}$ фиксируется при M^* или, точнее, при $M_0 \geq M^*$. При моделировании число заявок следует изменять, например, от единицы до значений, обеспечивающих появление узла с коэффициентом загрузки близким к единице. Затем выбирается несколько значений M_0 влево-вправо от точки насыщения, производится моделирование, строятся графики зависимости значений характеристик от числа заявок в системе.

6.1. Построение схемы модели и GPSS-модели

Для СИСТЕМЫ схема сети и ее GPSS-ориентированный вариант представлены на рисунке 5. За основу взята модель из § 3 (рисунок 3). В нее внесены изменения в соответствии с правилами преобразования сети в замкнутую: 1. Одиночный генератор заявок заменен на групповой b_0^* . Для этого в GPSS-модели использован оператор **GENERATE** „,M”, где в качестве значения M подставляется конкретное числовое значение – требуемое число заявок, постоянно циркулирующих в системе. 2. Введена обратная связь с выхода системы на ее вход. Для этого в GPSS-модели использован оператор **TRANSFER** ,Label_0. 3. Для управления длительностью моделирования добавлен дополнительный сегмент, обеспечивающий выполнение около 70000 заявок:

```
GENERATE 1000000
TERMINATE 1 .
```

Текст модели СИСТЕМЫ без контрольных точек представлен ниже:

```
b_2    STORAGE    4
        GENERATE  „,3
Label_0 SEIZE      b_1
        ADVANCE   (Exponential(2,0,4))
        RELEASE   b_1
Label_1 ENTER     b_2
        ADVANCE   (Exponential(3,0,24))
        LEAVE     b_2
        TRANSFER  .5,,Label_1
        TRANSFER  ,Label_0
        *****
        GENERATE  1000000
        TERMINATE 1
```

Полный текст модели представлен ниже:

```

b_2      STORAGE      4
        GENERATE      ,,3
Label_0  queue         U_system
        queue         w_b_1
        queue         u_b_1
        SEIZE         b_1
        depart        w_b_1
        ADVANCE       (Exponential(2,0,4))
        RELEASE       b_1
        depart        u_b_1
        queue         u_sum_b_2
Label_1  queue         w_b_2
        queue         u_b_2
        ENTER         b_2
        depart        w_b_2
        ADVANCE       (Exponential(3,0,24))
        LEAVE         b_2
        depart        u_b_2
        TRANSFER      .5,,Label_1
        depart        u_sum_b_2
        depart        U_system
        TRANSFER      ,Label_0
        *****
        GENERATE      1000000
        TERMINATE     1
    
```

6.2. Имитация системы. Прогнозирование характеристик

Выполним серию прогонов, изменяя значения M (параметр оператора GENERATE ,,M) как 1; 2; 3; 7; 10. Это, как видно из результатов, обеспечивает моделирование системы как до так и после насыщения! Фрагменты результатов моделирования представлены в таблице 12 и на графике (рисунок 6). Выводы: насыщение сети начинается при значениях $M_0 = M^*$ от 3 до 7 заявок (в точке насыщения примерно $M^* = 5$ заявок). Причина насыщения – второй узел. Наблюдаемая при этом максимальная пропускная способность системы $\lambda_0 = \lambda_{0,max}$ составляет около 0,083 заявки в единицу времени. Дальнейший рост числа заявок в системе не приводит к улучшению производительности.

Таблица 12 – Зависимость характеристик модели от числа заявок (замкнутый режим)

Характеристика		Значения характеристики при $M = M_0$				
		1	2	3	7	10
Узел 1	ρ_1	0,25	0,3	0,33	0,33	0,33
	l_1	0	0,08	0,12	0,17	0,17
	m_1	0,25	0,38	0,45	0,50	0,50
	ω_1	0	1,0	1,52	2	2
Узел 2	u_1	4	5,0	5,52	6	6
	ρ_2	0,75	0,92	0,98	1	1

Система	L	0	0,77	1,70	5,67	8,67
	λ_0	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08
	U	...	...	...	84	120,43
	W	...	...	...	68	104



Рисунок 6 – Зависимость пропускной способности сети λ_0 от M_0

6.3. Оценка предельных характеристик системы

Предельные характеристики объекта можно получить, построив асимптотическую модель. Допустим, что выполнение заявок в сети спланировано идеальным образом, то есть заменим случайные законы поступления и обслуживания заявок в сети детерминированными с сохранением средних значений их параметров. Это позволит рассчитать максимальную производительность системы λ_0 и соответственно минимальное время пребывания заявок в сети U_0 . До насыщения при любом числе заявок M , удовлетворяющем условию $M < M^*$ (M^* - число заявок, переводящих сеть в режим насыщения), заявки могут быть “идеально” спланированы и обрабатываются так, как если бы в сети была только одна заявка. В сети отсутствуют очереди. Время пребывания заявок в сети равно длительности обработки одной заявки $U_0(1) = U_1$, а производительность сети определяется по закону Литтла:

$$\begin{cases} U_0 = U_1 = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i = \sum_{i=1}^N t_{0i} = const \\ \lambda_0 = var = M / U_0 = M / \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i = M / U_1 = \lambda_0(M) \end{cases}$$

Если увеличивать число заявок M , то наступит момент насыщения и появится “узкое место” – узел с $\rho_s = 1$. Дальнейший рост M не будет вести к росту производительности, достигнутой в точке $M = M^*$ и определяемой пропускной способностью “узкого места”. Производительность будет постоянной и равной $\lambda_0(M) = M / U_0 = M^* / U_0$, а время пребывания заявки в сети определится по закону Литтла:

$$\begin{cases} \lambda_0 = M^*/U_0 = M^*/\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i = M^*/U_1 = const \\ U_0 = var = M/\lambda_0 = M \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i / M^* = U_0(M) \end{cases}$$

Здесь неизвестным является значение M^* . Для его определения выявляется потенциальное узкое место – узел s с $\rho_s = \max\{\rho_i\}$. А из уравнения $\rho_s = 1$ находят M^*

$$\rho_s = \lambda_s \cdot t_s / K_s = \lambda_0 \cdot \alpha_s \cdot t_s / K_s = M^* \cdot \alpha_s \cdot t_s / K_s \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i = 1 \quad .$$

$$\text{Тогда } M^* = K_s \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i / \alpha_s \cdot t_s .$$

Расчет предельных характеристик включает следующие этапы.

1. Вычислим коэффициенты передач устройств α_i (значение $\alpha_0 = 0$). Для этого построим и решим систему из N линейных уравнений, используя свойство линейности сети, выражаемое для каждого из устройств $i = 1, \dots, N$ как

$$\alpha_i = \sum_{j=0}^N \alpha_j \cdot p_{j,i} .$$

Для СИСТЕМЫ (она представлена сетью, например, на рисунке 5, б, которая состоит из $n = 4$ узлов, где $N = 2$ устройства) матрица переходов представлена ниже.

Таблица 13 – Матрица переходов P

	b^*_0	b_1	b_2
b^*_0	0	1	0
b_1	0	0	1
b_2	0,5	0	0,5

Здесь искомые величины – α_1 и α_2 . Соответственно система уравнений выглядит как

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_0 \cdot p_{0,1} + \alpha_1 \cdot p_{1,1} + \alpha_2 \cdot p_{2,1}; \\ \alpha_2 &= \alpha_0 \cdot p_{0,2} + \alpha_1 \cdot p_{1,2} + \alpha_2 \cdot p_{2,2}. \end{aligned}$$

А после подстановки значений $p_{i,j}$ из матрицы P система уравнений примет вид

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_0 \cdot 1 + \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_2 \cdot 0; \\ \alpha_2 &= \alpha_0 \cdot 0 + \alpha_1 \cdot 1 + \alpha_2 \cdot 0,5 \quad . \end{aligned}$$

Решив систему, получим значения $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 2$.

2. Находим узкое место системы. Для СИСТЕМЫ коэффициенты загрузок устройств определяются как

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \lambda_1 \cdot t_1 / K_1 = \alpha_1 \cdot \lambda_0 \cdot t_1 / K_1 = 4 \lambda_0 , \\ \rho_2 &= \lambda_2 \cdot t_2 / K_2 = \alpha_2 \cdot \lambda_0 \cdot t_2 / K_2 = 12 \lambda_0 . \end{aligned}$$

Соответственно $\rho_2 = \max(\rho_1; \rho_2)$ и номер узкого места $s = 2$.

3. Рассчитываем точку насыщения сети M^* . Для СИСТЕМЫ получаем

$$M^* = K_s \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot t_i / \alpha_s \cdot t_s = K_2 (\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2) / (\alpha_2 \cdot t_2) = 4,33(3) \text{ [заявки]}.$$

4. Рассчитываем характеристики системы до насыщения (при $M \leq M^*$). Для СИСТЕМЫ при $M \leq 4,33$

$$U_0 = U_1 = (\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2) = 52 \text{ [ед. времени] ,} \\ \lambda_0 = M / 52 \text{ [заявок в единицу времени].}$$

5. Рассчитываем характеристики системы после насыщения (при $M \geq M^*$). Для СИСТЕМЫ при $M \geq 4,33$ получаем

$$\lambda_0 = M^* / U_1 = 4,33 / 52 = 0,083 \text{ [заявок в единицу времени] ,} \\ U_0 = M / \lambda_0 = M / 0,083 \text{ [ед. времени].}$$

6. Строим графики зависимостей $\lambda_0 = \lambda_0(M)$ и $U_0 = U_0(M)$.

7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Ход выполнения работы, состав отчета, отчетных материалов (в скобках указаны номера аналогичных документов из данного Пособия) приведен ниже:

1. Описание задания, системы: – текст задания; – таблица 1. “Матрица переходов системы” (1); – таблица 2. “Параметры системы” (2).

2. Разработка концептуальной и математической модели. 2.1. Построение схемы модели: – рисунок 1. “Схема модели” (2); – таблица 3. “Уточненная матрица переходов” (3).

2.2. Описание параметров системы: – таблица 4. “Параметры запросов” (4); – таблица 5. “Параметры узлов” (5). **2.3. Описание характеристик системы:** – таблица 6. “Описание узловых характеристик” (6); – таблица 7. “Описание системных характеристик” (7).

3. Имитационное моделирование системы в разомкнутом режиме. 3.1. Построение схемы GPSS-модели: – рисунок 2. “Схема GPSS-ориентированной модели” (3); – таблица 8. “Измерение узловых характеристик” (8); – таблица 9. “Измерение и вычисление системных характеристик” (9). **3.2. Построение GPSS-модели:** – листинг 1. “Текст GPSS-модели”; – листинг 2. “Статистический отчет”. **3.3. Имитационное моделирование:** – таблица 10. “Результаты имитационного моделирования” (10). **3.4. Анализ исходного состояния.**

4. Аналитический расчет (модель).

5. Имитационное моделирование системы в замкнутом режиме. 5.1. Построение схемы GPSS-модели: – рисунок 3. “Схема GPSS-ориентированной модели (замкнутый режим)” (5). **5.2. Построение GPSS-модели:** – листинг 3. “Текст GPSS-модели (замкнутый режим)”; – листинг 4. “Статистический отчет (замкнутый режим)”. **5.3. Имитационное моделирование. Прогнозирование характеристик:** – таблица 11. “Результаты имитационного моделирования (замкнутый режим)” (11); – рисунок 4. “Зависимость характеристик от числа заявок (замкнутый режим)” (6). **5.4. Анализ исходного состояния.**

6. Оценка предельных характеристик системы.

Заключение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2005. – 343 с.
2. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
3. Кудрявцев, Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
Учебно-методические материалы по дисциплине:
4. Муравьев Г.Л. Моделирование систем: Курс лекций для студентов специальностей “АСОИ”, “ВМиС”. – Брест: БГТУ, 2003. – 164 с.
5. Муравьев Г.Л., Савицкий Ю.В., Хвещук В.И. Пособие “Моделирование систем. Курсовое проектирование” для специальности АСОИ. – Брест: БрГТУ, 2010. – 128 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КОМАНДЫ И ОПЕРАТОРЫ ЯЗЫКА GPSS

Команды предназначены для управления моделью. Команда **START A** – передает управление системе для моделирования. Значение A (целое) может задавать длительность моделирования – устанавливает счетчик завершения модели. Команда **RESET** – позволяет обнулить собранные статистические данные с сохранением текущего модельного времени и текущих состояний генераторов случайных чисел. **CLEAR** – аналогичен RESET, но с установкой датчиков в исходное состояние.

Операторы управления потоками транзактов:

generate [A], [B], [C], [D], [E] – генерирует поток заявок (транзактов) с заданным законом распределения промежутков времени между их появлениями. Операнд A задает среднее время, через которое появляется очередной транзакт, B – модифицирует его, придавая случайный характер. Если B – целое, то время появления берется по равномерному закону из диапазона $A \pm B$. Если B – ссылка на функцию, то время определяется произведением A на текущее значение функции B. При отсутствии B имитируется регулярный поток. Операнд D – предельное число транзактов, генерируемых в ходе моделирования. При отсутствии операндов A, B, C генерируется серия из D запросов, т. е. источник работает как групповой. На оператор GENERATE ссылаться нельзя;

terminate [A] – оператор, выполняющий функции приемника заявок. Извлекает транзакт из модели и уменьшает значение счетчика завершений на значение A;

advance A, [B] – задерживает запрос на время, подчиняющееся заданному закону распределения. Характер использования операндов аналогичен оператору GENERATE.

Операторы управления сбором статистики: **queue A** – отметить в первой контрольной точке (“очереди”) A; **depart A** – отметить во второй контрольной точке (“очереди”) A).

Операторы управления одноканальным обслуживающим узлом: **seize A** – захватить устройство (канал) с номером A; **release A** – освободить устройство с номером A.

Операторы управления памятью включают декларативный оператор <ИмяПамяти> **storage A**, предшествующий первому GENERATE, и задающий емкость памяти в виде числа каналов A. Управление памятью реализуется операторами: **enter A, [B]** – в многоканальном узле A захватить B каналов одновременно; **leave A, [B]** – в многоканальном узле A освободить B каналов одновременно.

Операторы управления маршрутами: **transfer** ,**B** – безусловно направляет каждый запрос к оператору с меткой **B**. **transfer** .<число>, **B**, **C** – вероятностный маршрутный узел, отправляющий транзакт с вероятностью, заданной в операнде **A**, в узел с меткой **C**. **C** с вероятностью 1 - .<число> транзакт отправляется в узел с меткой **B**.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОТЧЕТ GPSS

В процессе моделирования автоматически собираются данные и генерируется стандартный набор статистики. Составом можно управлять, расставляя точки сбора статистики - операторы **queue** и **depart**. Часть секций отчета представлена в таблице ниже.

Таблица 14 – Основные компоненты отчета GPSS

Значение поля	Назначение
Facility Entries Util. Ave.Time	СЕКЦИЯ - СТАТИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТРОЙСТВ номер, имя устройства количество входов в устройство коэффициент загрузки канала (ρ_j) среднее время обслуживания одного транзакта
Queue Entries Ave.count Ave.time	СЕКЦИЯ - СТАТИСТИКА "ОЧЕРЕДЕЙ" номер, имя пары контрольных точек число транзактов, прошедших контрольные точки среднее число транзактов в контролируемом фрагменте (длина очереди l_j) среднее время пребывания в контролируемом фрагменте (ожидания в очереди ω_j)
Storage Entries Ave.c Util.	СЕКЦИЯ - СТАТИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАМЯТЕЙ номер, имя памяти число транзактов, вошедших в память средний объем занятой памяти коэффициент загрузки памяти

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ GPSS WORLD

После запуска системы пользователь управляет ее работой через оконный интерфейс. Подпункт **Settings...** пункта меню **Edit** позволяет предварительно выполнить настройку системы - на вкладке **Reports** надо выбрать состав отчета о моделировании. Сеанс моделирования начинается либо загрузкой ранее созданного текста модели (из файла с расширением *.gps) либо, как показано ниже, созданием нового документа.

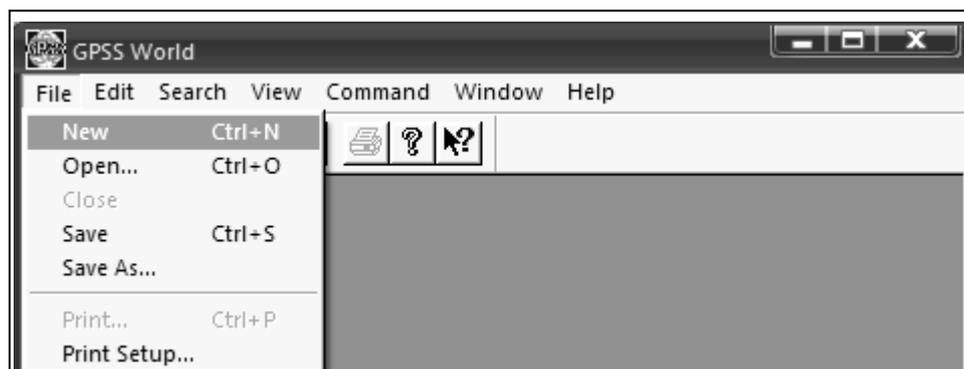


Рисунок 7 – Подменю File

Для этого задается тип нового документа – текст модели (Model).

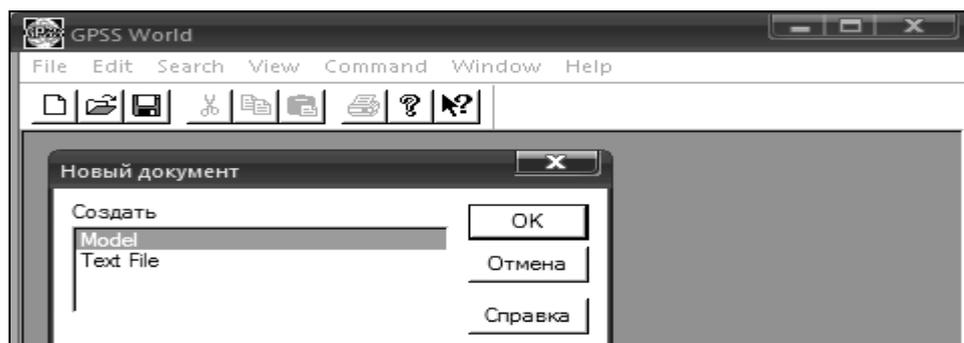


Рисунок 8 – Выбор типа документа

Затем пользователь получает возможность работать в клиентской области окна – вводить и редактировать описание модели. При этом операторы (блоки) GPSS могут вводиться вручную либо с использованием подпункта меню Insert GPSS Blocks... (Вставить GPSS блоки) - здесь нужный оператор выбирается из предложенной таблицы.

Для подготовки моделирования выполняется трансляция текста модели командой Create Simulation (Выполнить моделирование). В процессе моделирования GPSS ведет ряд файлов, таких как Журнал (Journal с расширением *.sim) для протоколирования выполняемых в процессе моделирования команд, Отчет (Report с расширением *.rpt) и т. д.

При нормальном завершении в Журнале появляется сообщение “Трансляция модели начата”. А затем сообщение – “Готово”.

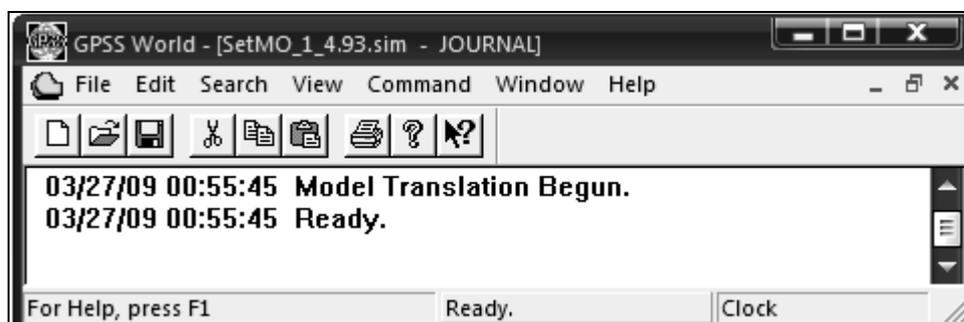


Рисунок 9 – Сообщения GPSS

При внесении изменений в текст модели, исправлении ошибок текст следует заново перетранслировать. Готовая модель запускается командой START.

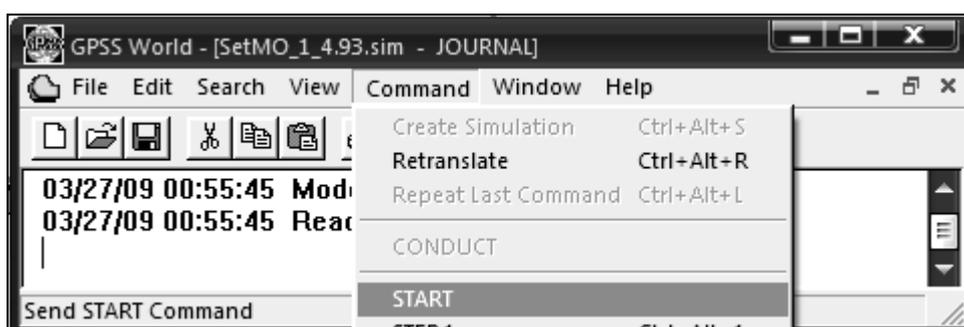


Рисунок 10 – Запуск модели GPSS

В окне команды Старт следует скорректировать параметр, влияющий на длительность моделирования. Например, заменить 1 на число 50 000 – число транзактов, которое должно пройти через модель до завершения моделирования. Начнется моделирование, которое может занять от долей секунд до минут и более в зависимости от сложности модели, длительности моделирования.

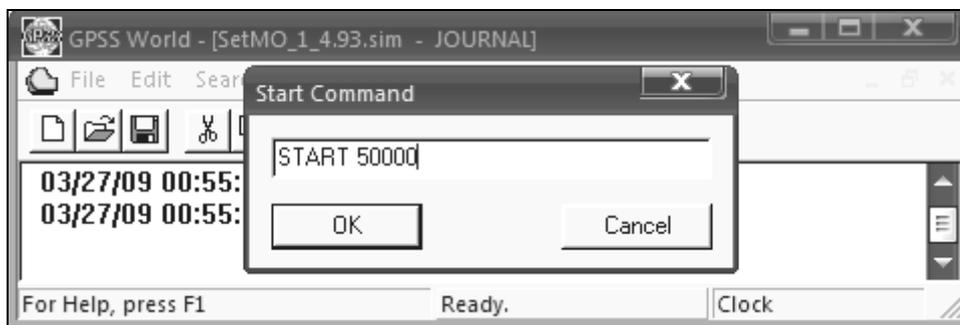


Рисунок 11 – Установка длительности моделирования. Запуск модели

В Журнале появится сообщение START 50 000 и Simulation in Progress (Выполняется моделирование). По окончании моделирования появляется сообщение The Simulation has ended (Моделирование завершено). При внесении изменений в текст модели, при исправлении ошибок текст следует заново перетранслировать.

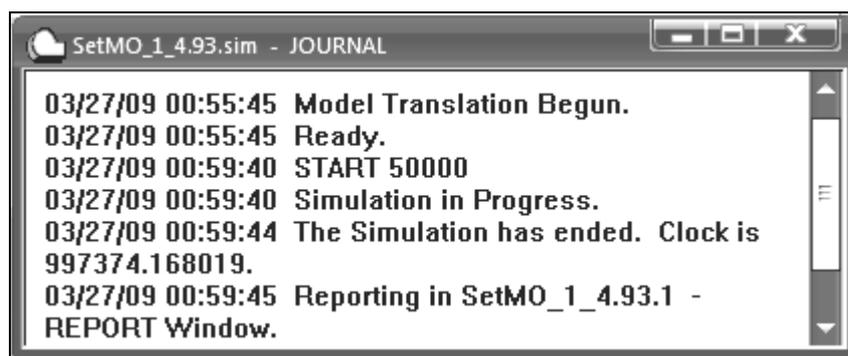


Рисунок 12 – Сообщения GPSS

При нормальном завершении моделирования (сообщение - The Simulation has ended) система автоматически сгенерирует файл Отчета о результатах моделирования.

При необходимости продолжить моделирование от текущей точки выполняется очередная команда START; для продолжения моделирования от текущей точки со сбросом накопленной статистики - команды RESET, START; для реализации нового моделирования в этом же сеансе следует либо заново перетранслировать модель либо привести систему в исходное состояние командой CLEAR и выполнить START.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ТИПОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В системе GPSS World есть библиотека функций для генерации многочисленных типовых распределений, часть из которых представлена ниже.

Дискретное равномерное распределение. Функция Integer Y = **DUNIFORM**(Stream, Min, Max) возвращает одно вещественное число – значение указанного распределения. Аргументы функции: - Stream – номер используемого встроенного датчика равномерно-

распределенных чисел в диапазоне 0-1 (произвольное натуральное число от единицы); – Min, Max – левая и правая границы распределения (вещественное число). Значение функции – одно значение указанного распределения (целое число).

Непрерывное экспоненциальное распределение. Функция $\text{real } Y = \text{EXPONENTIAL}(\text{Stream}, \text{Locate}, \text{Scale})$ возвращает вещественное число. Аргументы функции: – Stream – номер датчика равномерно-распределенных чисел (натуральное число от единицы); – Locate – смещение (обычно ноль, вещественное число); - Scale – параметр экспоненциального распределения $1 / \lambda$ (только вещественное положительное число).

Непрерывное гамма-распределение. Функция $\text{real } Y = \text{GAMMA}(\text{Stream}, \text{Locate}, \text{Scale}, \text{Shape})$. Аргументы функции: – Stream – номер датчика равномерно-распределенных чисел (натуральное число от единицы); – Locate – смещение (обычно ноль, вещественное число); – Scale – параметр экспоненциального распределения $1 / \lambda$ (только вещественное положительное); – Shape – только вещественное положительное число (при Shape = 1 распределение превращается в экспоненциальное; - при Shape = m, где m положительное целое число, распределение превращается в распределение Эрланга порядка m).

Непрерывное треугольное распределение. Функция $\text{real } Y = \text{TRIANGULAR}(\text{Stream}, \text{Min}, \text{Max}, \text{Mode})$. Аргументы функции: – Stream – номер датчика равномерно-распределенных чисел (натуральное число от единицы); Min, Max – левая и правая границы распределения (вещественные числа); – Mode – мода, наиболее вероятное значение распределения (вещественное число).

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	3
2. ПРИМЕР СИСТЕМЫ	3
3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ	4
3.1. Построение схемы модели	6
3.2. Описание параметров потока запросов и узлов	6
3.3. Описание характеристик	7
4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ	8
4.1. Построение схемы GPSS-ориентированной модели	8
4.2. Организация сбора статистики	8
4.3. Построение GPSS-модели	9
4.4. Имитация системы	10
4.5. Анализ исходного состояния системы	12
5. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	12
6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ В ЗАМКНУТОМ РЕЖИМЕ	15
6.1. Построение схемы модели и GPSS-модели	16
6.2. Имитация системы. Прогнозирование характеристик	17
6.3. Оценка предельных характеристик системы	18
7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	20
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КОМАНДЫ И ОПЕРАТОРЫ ЯЗЫКА GPSS	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОТЧЕТ GPSS	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ GPSS WORLD	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ТИПОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	24

Учебное издание

Составители:

*Муравьев Геннадий Леонидович,
Мухов Сергей Владимирович,
Савицкий Юрий Викторович*

Методические указания

к выполнению контрольных работ
«Моделирование систем на базе сетей с очередями»
для студентов специальности АСОИ заочной формы обучения

Ответственный за выпуск: Муравьев Г.Л.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 11.09.2018 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Arial Narrow». Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,75. Заказ № 1105. Тираж 25 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.