

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Кузбасский государственный технический  
университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра информационных и автоматизированных  
производственных систем

Составители  
В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов,  
П. И. Николаев, И. С. Кузнецов

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ С ГРУППАМИ ОБОРУДОВАНИЯ**

**Методические указания к лабораторной работе**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления подготовки  
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» в  
качестве электронного издания для использования в образовательном  
процессе

Кемерово 2022

**Рецензенты:**

**Чичерин И. В.** – к.т.н., доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем

**Зиновьев Василий Валентинович**

**Стародубов Алексей Николаевич**

**Николаев Петр Игоревич**

**Кузнецов Игорь Сергеевич**

**Моделирование производственной системы с группами оборудования:** методические указания к лабораторной работе для обучающихся направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств, всех форм обучения / сост. В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, П. И. Николаев, И. С. Кузнецов; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2022. – Текст : электронный.

В данных методических указаниях разработанных по дисциплине «Моделирование систем и процессов» приведены цель и задача, общие сведения об изучаемом материале, задания для выполнения, вопросы для самопроверки. Рекомендуемая литература для самостоятельной подготовки приведена в рабочей программе дисциплины.

© Кузбасский государственный  
технический университет имени  
Т. Ф. Горбачева, 2022

© В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов,  
П. И. Николаев, И. С. Кузнецов,  
составление, 2022

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
2	ПРИМЕР ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	23
3	ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	27
4	ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	29
5	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	29
6	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	29

**Цель работы** – применение практических навыков у студентов по оценке загрузки оборудования по группам на имитационной модели построенной в среде GPSS World.

## **1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **Общие сведения о GPSS World**

Среда компьютерного моделирования GPSS World - комплексный моделирующий инструмент, охватывающий области как дискретного, так и непрерывного компьютерного моделирования, обладающий высоким уровнем интерактивности и визуального представления информации.

Основу среды имитационного моделирования составляет язык GPSS, основанный на теории массового обслуживания - концепции движения объектов через приборы с некоторым временем обслуживания. Закон движения объектов и время обслуживания могут изменяться по различным законам распределения случайных величин. Принцип работы модели GPSS заключается в перемещении транзактов от блока к блоку.

В среду компьютерного моделирования также входит расширенный редактор GPSS World – инструмент для разработки имитационных моделей и анализа результатов моделирования.

При использовании GPSS World модель сначала строят в виде блок-схемы, обеспечивающей наглядность перед записью программы. Блоки имеют свои графические интерпретации, с помощью которых отображается пространственная конструкция модели. На рис. 1-1 представлена гипотетическая блок-схема некоторой модели на GPSS World.

Информация, представленная в блок-схеме, может относиться к трем различным категориям:

1. Местоположение. Каждый блок занимает определенное место в блок-схеме. Это место может быть определено нумерацией, которую интерпретатор осуществляет автоматически. Часто нужно знать, какое место занимает тот или иной блок в модели. Это может оказаться необходимым для реализации ссылки из одного или более блоков на указанный блок. Для этих целей в GPSS World используются символические имена.

2. Операции (ADVANCE, RELEASE и т. д.) – команды, описывающие основное функциональное назначение блоков.

3. Операнды (A, B, C, D, E...) – информация специфичная для действия блока.

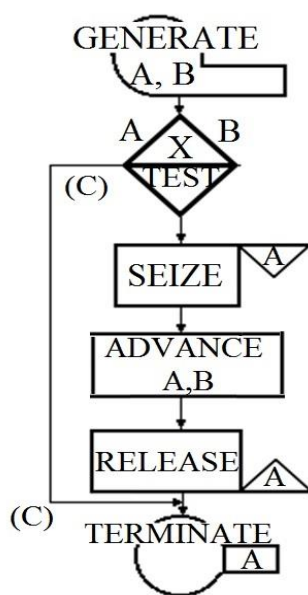


Рис. 1-1 Блок-схема модели на GPSS World

Модель GPSS World состоит из различных объектов. Для упрощения разделим эти объекты на три типа: транзакты, блоки и операторы.

Транзакты – динамические элементы модели GPSS World, представляют собой аналоги заявок в системах массового обслуживания (СМО). Они могут описывать, например, заготовки, транспортные средства, рабочих, требования к выполнению какой-либо операции и т. п. Блоки задают логику функционирования модели системы и определяют пути движения транзактов по ней. Блоки – аналоги приборов в СМО, которые отображают, например, участки цеха, станки, транспортные средства. Перемещаясь от блока к блоку, транзакты имитируют процессы, происходящие в системе: обработка заготовки, перемещение транспортного средства, восстановление вышедшего из строя станка и т. д. Блоки функционируют только тогда, когда в них находятся транзакты.

Операторы предназначены для управления процессом моделирования (прогоном модели), задания функций и последовательностей псевдослучайных чисел генераторов GPSS World. Операторы напрямую не взаимодействуют с транзактами.

В процессе моделирования интерпретатор GPSS World автоматически регистрирует и корректирует некоторую информацию, касающуюся различных элементов, используемых в моделях. Кроме информации, которая выдается по окончании моделирования, существует и такая информация, которая доступна в процессе моделирования. Эту информацию можно использовать с помощью атрибутов модели. Атрибутами являются: состояние прибора (занят, не занят), счетчик циклов занятий прибора, коэффициент использования прибора, среднее время задержки на одно занятие, величина параметра транзакта, время пребывания транзакта в модели. В процессе моделирования системы транзакты взаимодействуют с блоками, в результате чего происходят изменения их атрибутов, а также преобразования арифметических или логических значений. Такие преобразования называются событиями.

### **Моделирование начала технологического процесса**

Принцип работы модели GPSS World заключается в перемещении транзактов от блока к блоку. В начале в модели нет транзактов. Следовательно, для того, чтобы модель начала функционировать, необходимо создать и запустить транзакты в модель. В GPSSWorld для этих целей используется блок GENERATE.

Блок GENERATE (генерировать) – создание и ввод транзактов в модель (рис. 1-2).

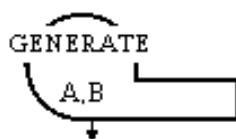


Рис. 1-2 Блок GENERATE

В блоке можно использовать 5 операндов (A, B, C, D, E).

#### *Примечание*

Транзакты могут создаваться через интервалы времени, распределенные по различным законам. Все возможные виды распределения временных интервалов разделим на равномерное и все другие виды распределения. Пока что будем рассматривать только равномерное распределение.

В операнде А записывают среднее значение равномерно распределенных интервалов времени, в операнде В – половину поля допуска распределенного интервала. Операнд С предназначен для задания смещения интервалов. В операнде D указывают значение, ограничивающее число создаваемых транзактов. В операнде Е задают приоритет вышедшим транзактам. По умолчанию значения операндов А, В, Е равны нулю, а операнда D –  $\infty$ . Операнд С по умолчанию не задает смещение.

Особенности блока GENERATE:

- в модели может использоваться множество блоков GENERATE, при этом каждый из них образует свой сегмент модели;
- в блок GENERATE невозможно направить транзакт;
- значения, устанавливаемый в операндах не могут быть отрицательными;
- обязательно используется либо операнд А, либо операнд D.

Примеры блока GENERATE:

GENERATE 4.1,2.1

транзакты создаются каждые  $4.1 \pm 2.1$  единицы времени.

GENERATE 4.1,,3

первый транзакт создается во время, равное 3, второй во время – 7.1, третий – 11.2 и т. д.

GENERATE 1,,,1

первый и единственный транзакт создается во время, равное 1.

GENERATE 8,1,,,4

каждый созданный транзакт будет иметь уровень приоритета, равный 4 (транзакт с более высоким приоритетом обслуживается раньше, чем транзакт с меньшим приоритетом).

### **Моделирование завершения технологического процесса**

Созданные транзакты, двигаясь по модели, имитируют операции, происходящие в реальном техпроцессе. Для того чтобы остановить моделирование, необходимо вывести определенное количество транзактов из модели или остановить модель через какое-то заданное время. Для этого используют блок TERMINATE.

Блок TERMINATE (завершить) – удаление транзактов из модели (рис. 1-3).



Рис. 1-3 Блок TERMINATE

При входе транзакта в блок TERMINATE он уничтожается и из специального счетчика завершения вычитается целое число, записанное в операнде А. Счетчик завершения – ячейка памяти, которая хранит положительное целое значение, записанное в начале моделирования. Счетчик завершения в модели GPSS World может быть только один. Если его значение станет равным 0 (или меньше 0), моделирование прекратится. Если значение операнда А не установлено (т. е. равно 0), значение счетчика завершения не изменяется.

Примеры блока TERMINATE:

TERMINATE 1

удаляет транзакты из модели, при этом содержимое счетчика завершения (каждый раз при входе транзакта) уменьшается на единицу.

TERMINATE

удаляет транзакты из модели, при этом содержимое счетчика завершения не изменяется.

После того, как написана GPSS World-программа, прежде чем выполнять прогоны модели, к ней необходимо добавить специальные операторы. Одним из таких операторов является START.

Оператор START – устанавливает значение счетчика завершения.

В операнде А оператора START записывается начальное значение счетчика (больше 0).

**Пример:**

1. Предположим, что требуется промоделировать техпроцесс в течение 480 единиц времени. Для этого необходимо:



- а) в модель включить сегмент из двух блоков, называемый счетчиком модельного времени (рис. 1-4);
- б) во всех прочих блоках TERMINATE операнд А обнулить;
- в) операнд А оператора START установить равным 1.

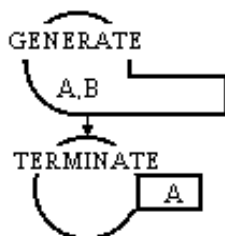


Рис. 1-4 Счетчик модельного времени

Часть программы GPSS World будет иметь следующий вид:

\* 1-й сегмент модели  
GENERATE 3.2,1.2,,2

...  
TERMINATE

\* 2-й сегмент модели  
GENERATE 480  
TERMINATE 1  
START 1

В момент модельного времени 480 транзакт выйдет из блока GENERATE второго сегмента и сразу же попадет в блок TERMINATE. Поскольку операнд этого блока содержит 1, то из счетчика завершения отнимется 1. Это уменьшит значение счетчика до 0, и интерпретатор остановит прогон модели.

2. Предположим, что требуется закончить прогон модели, после того как будет обслужено 100 транзактов. Для этого необходимо:

а) установить значение операнд А оператора START равным 100;

б) установить операнд А блока TERMINATE равным 1.

Часть программы GPSS World будет иметь следующий вид:

GENERATE 3.2,1.2,,2

...  
TERMINATE 1  
START 100

Когда транзакт будет входить в блок TERMINATE, счетчик завершения будет уменьшаться на 1. Прогон будет продолжаться, пока значение счетчика не достигнет 0 (т. е. пока не удалится 100 транзактов).

### **Моделирование технологических операций**

Операции в технологических процессах (обработка заготовок, транспортировка изделий и т. п.) отображаются в СМО временем обслуживания заявки прибором. Для имитации этого в модели GPSS World необходимо задержать транзакт в приборе на время обслуживания заявки. Для этих целей используют блок ADVANCE.

Блок ADVANCE (задержать) – задержка транзактов (рис. 1-5).

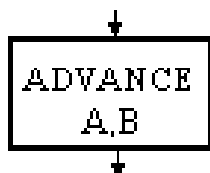


Рис. 1-5 Блок ADVANCE

При равномерном распределении в операнд А записывают среднее время задержки транзакта, а в операнд В – половину поля допуска. (Неравномерное распределение будет рассмотрено позже). Значение по умолчанию для операндов А и В равно 0.

Примеры блока ADVANCE:

ADVANCE 2.1

транзакты задерживаются на 2.1 единицы времени.

ADVANCE 3.75,1

задержка транзактов колеблется в интервале от 2.75 до 4.75 единиц.

Особенности блока ADVANCE:

- если вычисленное приращение времени меньше нуля, то обработка модели останавливается по ошибке;
- в блоке ADVANCE может одновременно находиться более одного транзакта. При этом каждый транзакт задерживается на определенное в блоке время.

## Моделирование технологического оборудования

При формализации технологических процессов при помощи математического аппарата СМО элементы, которые представляют обслуживание, моделируются приборами. Прибором могут быть, например, станок, транспортное средство, робототехнический комплекс и т. п. Для их моделирования в GPSS World используется пара блоков SEIZE и RELEASE.

Блок SEIZE (занять) – занятие прибора обслуживания (рис. 1-6).

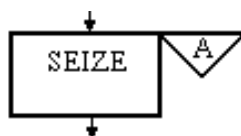


Рис. 1-6 Блок SEIZE

В операнде А записывают имя занимаемого прибора (указывается обязательно). Если транзакт входит в блок SEIZE, он занимает прибор обслуживания и закрывает вход следующим транзактам.

Пример блока SEIZE:

SEIZE SERVER

при входе транзакта в блок занимается прибор с именем SERVER.

Блок RELEASE (освободить) – освобождение занятого прибора обслуживания (рис. 1-7).

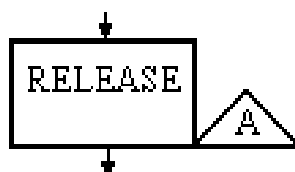


Рис. 1-7 Блок RELEASE

Операнд А – имя освобождаемого прибора (указывается обязательно).

Пример блока RELEASE:

RELEASESERVER

при входе транзакта прибор SERVER освобождается и разрешается вход в него (в блок SEIZESERVER) других транзактов.

Приборы в моделях GPSS World могут быть размещены по разным схемам.

### Моделирование группы технологического оборудования

Часто в технологических системах используют группу оборудования. В терминах СМО – группу приборов, каждый из которых выполняет аналогичное обслуживание, например, параллельно работающие токарные или фрезерные станки на участке механообработки некоторого предприятия. Такие приборы, обладающие одинаковыми свойствами, моделируют многоканальным устройством. Число приборов, которое моделирует многоканальное устройство, определяется пользователем и называется емкостью многоканального устройства.

Так же как для приборов обслуживания, для моделирования многоканального устройства используются два блока ENTER и LEAVE.

Блок ENTER (войти) – занятие прибора(ов) из группы (рис. 1-8).

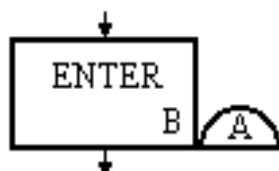


Рис. 1-8 Блок ENTER

Имитирует включение параллельно работающего оборудования. При входе транзакта в блок ENTER моделируется занятие приборов, число которых указывается в операнде В. Имя группы параллельно работающих приборов указывается в операнде А.

Примеры блока ENTER:

ENTER TOKARN

транзакт занимает один прибор многоканального устройства TOKARN.

ENTER TOOLS,2

транзакт занимает два прибора многоканального устройства TOOLS (оба модуля должны быть свободны).

Блок LEAVE (выйти) – освобождение прибора(ов) из группы (рис. 1-9).

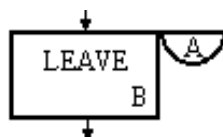


Рис. 1-9 Блок LEAVE

Имитирует выключение параллельно работающего оборудования. Значения операндов А и В те же, что и для блока ENTER.

Примеры блока LEAVE:

LEAVE TOKARN

транзакт освобождает один прибор многоканального устройства TOKARN.

LEAVE TOOLS, 2

транзакт освобождает два прибора многоканального устройства TOOLS.

Многоканальные устройства характеризуются емкостью, которую необходимо задавать в начале моделирования. Это делается при помощи оператора STORAGE.

Оператор STORAGE – задает емкость многоканального устройства.

NAME STORAGE A

В операнде А указывается целое число, определяющее его емкость, а вместо NAME указывается имя многоканального устройства.

Примеры оператора STORAGE:

TOKARN STORAGE 2

задается многоканальное устройство с именем TOKARN и с пропускной способностью, равной 2.

### **Сбор статистики о накопителях**

При использовании в моделях GPSS World приборов и многоканальных устройств интерпретатор автоматически собирает информацию относительно коэффициентов загрузки приборов, среднего времени занятия приборов и т. п. Очень часто бывает необходимо собрать некоторую статистику о накопителях (об очереди): максимальное и среднее значения длины очереди, среднее время ожидания в очереди и т. д. Специализированный

язык GPSS World имеет специальные блоки QUEUE и DEPART, позволяющие осуществлять автоматический сбор такого рода статистической информации.

Блок QUEUE (встать в очередь) – начало автоматического сбора статистических данных о накопителях (рис. 1-10).

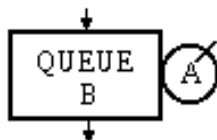


Рис. 1-10 Блок QUEUE

В операнде А записывается имя очереди, к которой необходимо присоединиться, а в операнде В – число элементов, на которое должно измениться значение содержимого очереди.

Блок DEPART (покинуть очередь) – окончание автоматического сбора статистических данных о накопителях (рис. 1-11).

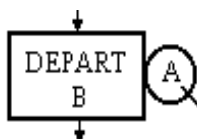


Рис. 1-11 Блок DEPART

Значения операндов А и В те же, что и для блока QUEUE.

Ниже приводятся GPSS-модели роботизированного технологического комплекса, в которых используются блоки QUEUE и DEPART. В варианте а) измеряется время нахождения транзактов в очереди перед блоком SEIZE (очередь с именем COM), в варианте б) – общее время пребывания транзакта в приборе обслуживания с учетом времени нахождения транзакта в очереди (очередь с именем VS):

<p>а)</p> <p>GENERATE 100,40</p> <p>QUEUE COM</p> <p>SEIZE RTK</p> <p>DEPART COM</p> <p>ADVANCE 80,50</p> <p>RELEASE RTK</p> <p>TERMINATE 1</p> <p>START 50</p>	<p>б)</p> <p>GENERATE 100,40</p> <p>QUEUE VS</p> <p>SEIZE RTK</p> <p>ADVANCE 80,50</p> <p>RELEASE RTK</p> <p>DEPART VS</p> <p>TERMINATE 1</p> <p>START 50</p>
---	---

В этих моделях помимо информации о времени моделирования и о приборах будет собираться информация об очереди, которая включает максимальный и средний размер очереди за время моделирования, общее число транзактов, которые занимали очередь, среднее время нахождения транзакта в очереди и т. п.

### **Моделирование случайных событий**

Процессы в реальных системах, как правило, случайны. Поэтому учет случайности играет важную роль в процессе моделирования. Тем не менее, в современных условиях получить такое число, которое было бы действительно случайным (т. е. не зависело ни от каких других чисел) не представляется возможным. Для проведения экспериментов, учитывающих случайность процессов, необходимо генерировать *псевдослучайные числа*. Их особенность в том, что на практике первые  $N$  чисел из ряда псевдослучайных (где  $N$  – период генератора случайных чисел) подчиняются законам статистического равномерного распределения и могут приниматься за случайные, а остальные – нет. В GPSS World используется алгоритм генерации чисел, очень похожий на рассматриваемый ниже.

Представим, что целью генерации является получение четырехзначных чисел, равномерно распределенных на интервале от 0,0000 до 0,9999 включительно. Для этого используются два положительных четырехзначных нечетных числа, одно из которых не меняет своего значения («ядро»), а другое переменное («множитель»). Когда требуется сгенерировать новое псевдослучайное число, первым шагом алгоритма является перемножение «ядра» на «множитель». В итоге получается восьмизначное число. Последние 4 цифры его используются для получения нового «множителя», а средние 4 цифры идут как результат операции – псевдослучайное число. Рассмотрим это на примере.

Если ядро – 7351, а множитель – 2689, то первое псевдослучайное число и второй множитель разыграются по схеме:

$$7351 \times 2689 = 19766839.$$

Тогда множителем будет 6839 (последние четыре цифры числа 19766839), а разыграется число 0,7668 (цифры числа 19766839 от третьей до шестой включительно).

Дальше ядро сохраняет свое значение и перемножается с новым множителем:

$$7351 \times 6839 = 50273489.$$

Множителем будет 3489, а разыгрывается число 0,2734, и т. д.

Дальнейшие розыгрыши псевдослучайных чисел можно проследить в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Генерация первых десяти чисел ядра 7351

	Множитель	Восьмиразрядное произведение	Псевдослучайное число
Начальное значение множителя	2689	19766839	0,7668
Следующие множители и псевдослучайные числа	6839	50273489	0,2734
	3489	25647639	0,6476
	7639	56154289	0,1542
	4289	31528439	0,5284
	8439	62035089	0,035
	5089	37409239	0,4092
	9239	67915889	0,9158
	5889	43290039	0,29
	0039	00286689	0,2866

У такого алгоритма есть один серьезный недостаток – ядро и множитель должны быть обязательно нечетными, чтобы новые получаемые множители были также нечетны. В противном случае генератор рискует в качестве множителя получить число 0000 и генерировать его же каждый следующий шаг.

Генератор псевдослучайных чисел GPSS World работает по такому же принципу, но имеет перед ним еще одно преимущество: кроме множителя GPSS разыгрывает номер очередного ядра одного из восьми генераторов случайных чисел, на основе которого будет строиться новое псевдослучайное число.

В ходе моделирования разыгранные псевдослучайные числа используются для вычисления времени между двумя входами транзактов через блок GENERATE, вычисления времени задержки транзактов в блоке ADVANCE, определения вероятностной передачи транзактов через блок TRANSFER, вероятностной проверки условия в блоке TEST (см. ниже) и т. д. Все эти вычисле-



ния и определения производятся в соответствии с функциями. Функции могут быть дискретными и непрерывными, детерминированными и вероятностными. Для розыгрыша случайных чисел при использовании вероятностных функций используются встроенные датчики равномерного распределения в интервале (0, 1), указывающиеся как RN1, RN2, ..., RNX.

Для задания функций в GPSS World используется оператор FUNCTION.

Оператор FUNCTION – определяет функцию.

NAME      FUNCTION      A, B

В поле NAME записывается имя функции. В операнде A записывается номер используемого генератора случайных чисел (от 1 до 8). В операнде B указывается определитель функции (CN, DN, EN, LN, MN), а N – число различных значений, получаемых случайной переменной (суммарная частота). Далее должны следовать строки определения функции со значениями суммарной частоты и соответствующими им значениями случайной переменной.

*Примечание:*

Функции с операндами EN – атрибутная, LN – списочная и MN – атрибутно-списочная в базовом курсе не рассматриваются.

### **Определение дискретной функции**

Дискретные функции предназначены для имитации дискретных случайных процессов, заданных функцией распределения  $F(x)$ . Функция распределения задается таблицей, в которой указаны пары: значения аргумента, имеющего равномерное распределение в интервале (0, 1), и соответствующие значения функции.

В соответствии с информацией таблицы можно задать дискретную функцию, определив суммарную частоту случайной переменной (табл. 1.2) и используя оператор FUNCTION следующим образом:

KAT      FUNCTION      RN4,D6  
.1,1/.4,2/.6,3/.7,4/0.85,6/1,8

Таблица 1.2

## Дискретная функция распределения

Значения случайной величины	Относительная частота	Суммарная частота
1	0,10	0,10
2	0,30	0,40
3	0,20	0,60
4	0,10	0,70
6	0,15	0,85
8	0,15	1,00

Функция имеет символическое имя КАТ. В качестве источника случайных чисел выступает RN4. Дискретная переменная может иметь шесть значений. Суммарные частоты и соответствующие им шесть значений записаны как шесть пар чисел на следующей строке. На рис. 1-12 приведена ее графическая интерпретация.

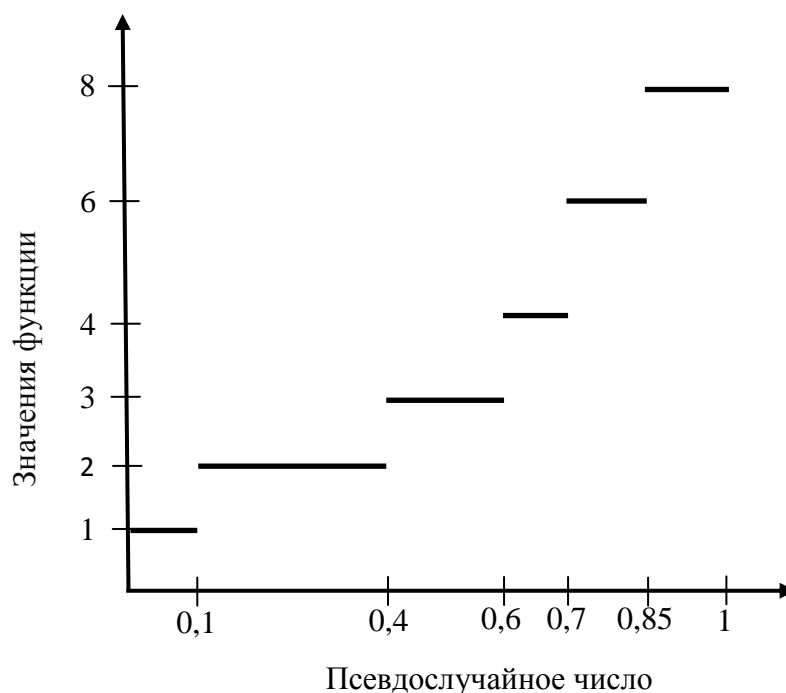


Рис. 1-12 Графическая интерпретация дискретной функции

Функция состоит из серии горизонтальных ступенек. Например, первая ступенька перекрывает значения до 0,1 включительно. Вторая ступенька начинается от значения 0,1 и продолжается до 0,4 включительно и т. д.

На дискретную функцию можно ссылаться для розыгрыша значений в блоках GENERATE и ADVANCE.

Процедуру имитационного моделирования с использованием дискретной функции покажем на примере обработки заготовок различных типов станком с ЧПУ.

На станок с ЧПУ каждые  $33 \pm 2$  мин (распределение равномерное) поступают заготовки различных типов – А и Б, которые требуют различного времени обработки. Заготовки типа А поступают с вероятностью 0,65 и требуют для обработки 45 мин. Заготовки типа Б поступают с вероятностью 0,35, их время обработки составляет 30 мин.

Для реализации модели подобного техпроцесса воспользуемся дискретной функцией, принимающей значения 45 с вероятностью 0,65, и значения 30 с вероятностью 0,35. GPSS World-модель техпроцесса приведена ниже.

RAND FUNCTION	RN1,D2	Определение дискретной функции
0.65,50/1,30		Строки определения функции
GENERATE 33,2		Поступление заготовок
SEIZE STAN		Включение станка с ЧПУ
ADVANCE FN\$RAND		Обработка
RELEASE STAN		Выключение станка с ЧПУ
TERMINATE 1		Готовая деталь
START 500		Программа выпуска

В приведенной модели функция, принимающая случайные значения с заданными вероятностями, имеет имя RAND. В модели показано, каким образом следует обращаться к этой функции для реализации изменяющейся задержки в блоке ADVANCE. Начало ссылки на функцию содержит символы «FN» (это общее название функций всех типов). Затем следует символ «\$», после которого идет собственно символическое имя.

### **Определение непрерывной функции**

Дискретные случайные переменные могут иметь только фиксированное число значений. В противоположность этому непрерывные случайные переменные могут иметь неограниченное число различных значений на заданном интервале. Для определе-

ния непрерывной функции, так же как и для определения дискретной, используют оператор FUNCTION. Непрерывные функции предназначены для имитации случайных процессов, заданных непрерывной функцией распределения  $F(x)$ . Функция распределения может быть также задана таблицей, в которой указаны пары: значения аргумента, имеющего равномерное распределение в интервале  $(0, 1)$ , и соответствующие интервалы значений функции. Например, в табл. 1.3 заданы интервалы значений непрерывной случайной величины. Первая строка таблицы показывает, что ни одно значение случайной величины не попало в интервал от 0 до 3. Вторая строка таблицы показывает, что 4 % значений случайной величины попали в интервал от 3 до 6 и т. д.

Таблица 1.3

Непрерывная функция распределения

Интервалы значений случайной величины	Относительная частота попадания в интервал	Суммарная частота
менее 3	0,00	0,00
от 3 до 6	0,04	0,04
от 6 до 9	0,11	0,15
от 9 до 18	0,23	0,38
от 18 до 27	0,30	0,68
от 27 до 81	0,32	1,00

Так же, как и при определении дискретной функции, в соответствии с информацией табл. 1.3 можно задать непрерывную функцию, определив суммарную частоту и используя оператор FUNCTION:

```
BOX      FUNCTION    RN1,C6
.0,3/.04,6/.15,9/.38,18/.68,27/1,81
```

Функция, имеющая символическое имя BOX, будет принимать с вероятностью 0 значения, равномерно распределенные в интервале  $(0, 3)$ , с вероятностью, равной 0,04, – значения, равномерно распределенные в интервале  $(3, 6)$ , с вероятностью 0,11 – значения, равномерно распределенные в интервале  $(6, 9)$  и т. д. Последний интервал значение 81 не включает, потому что результат розыгрыша случайной величины, равномерно распределенной в интервале  $(0, 1)$  с помощью датчика RN1, никогда не будет равен 1 – все датчики с именами RN в GPSS World дают

значения, равномерно распределенные от 0.000001 до 0.999999. Графическая интерпретация функции представлена на рис. 1-13.

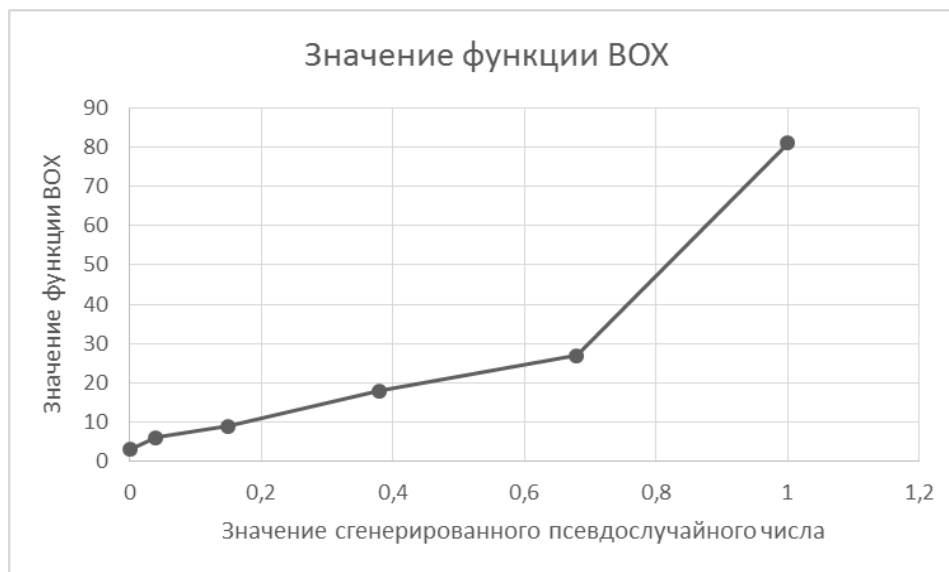


Рис. 1-13 Графическая интерпретация функции BOX

Если RN1 выдает число 0,04 или меньшее, интерпретатор выполняет линейную интерполяцию между значениями 3 и 6 и определяет значение функции. Если RN1 в точности равно 0,04, значением функции будет 6 и т. д.

На непрерывную функцию можно ссылаться из блоков GENERATE и ADVANCE, как и на дискретную.

### **Определение функций по заданному закону распределения**

Если закон распределения случайной переменной заранее известен, нет необходимости задавать функцию вручную, определяя значения случайной переменной и соответствующие значения суммарной частоты. Для моделирования случайных событий с известным законом распределения GPSS World имеет встроенные функции, которые генерируют произвольные случайные переменные. В GPSS World доступно более 20 встроенных вероятностных распределений:

- Бета (Beta);
- Биномиальное (Binomial);
- Дискретно-равномерное (Discrete Uniform);
- Экспоненциальное (Exponential);
- Экстремального значения A (Extreme Value A);

- Экстремального значения В (Extreme Value В);
- Гамма (Gamma);
- Геометрическое (Geometric);
- Обратное Гаусса (Inverse Gaussian);
- Обратное Вейбулла (Inverse Weibull);
- Лапласа (Laplace);
- Логистическое (Logistic);
- Логлапласово (LogLaplace);
- Логлогистическое (LogLogistic);
- Логнормальное (LogNormal);
- Отрицательное биномиальное (Negative Binomial);
- Нормальное (Normal);
- Парето (Pareto);
- Пирсона типа V (Pearson Type V);
- Пирсона типа VI (Pearson Type VI);
- Пуассона (Poisson);
- Треугольное (Triangular);
- Равномерное (Uniform);
- Вейбулла (Weibull).

Общий вид задания распределения выглядит следующим образом:

Name(Stream,Locate,Scale,Shape)

Name – код вызова конкретного распределения;

Stream – номер генератора случайных чисел;

Locate – определяет горизонтальное расположение функции распределения;

Scale – определяет масштаб функции распределения;

Shape – определяет форму функции распределения.

*Примечание.*

Не во всех вероятностных функциях распределения используются все четыре параметра.

Также особое внимание нужно обратить на синтаксис функций распределения, когда они являются параметрами блоков. В таком случае функция распределения берется в скобки.

Например:

GENERATE (Weibull(1,20,3,3))

В табл. 1.4 приведены некоторые наиболее применяемые законы распределения, поддерживаемые GPSS World.

Таблица 1.4

#### Встроенные функции

Распределение	Формат функции
Гамма	Gamma(Stream,Locate,Scale,Shape)
Геометрическое	Geometric(Stream,Locate[0..1])
Лапласа	Laplace(Stream,Locate,Scale)
Логистическое	Logistic(Stream,Locate,Scale)
Логлапласово	Loglaplace(Stream,Locate,Scale,Shape)
Парето	Pareto(Stream,Locate,Scale)
Треугольное	Triangular(Stream,Locate,Scale,Shape)

Например, необходимо смоделировать поступление заготовок в робототехнический комплекс. Интервалы между поступлением заготовок распределены согласно экспоненциальному закону с параметром  $\lambda = 7$ . Для имитации поступления заготовок используем блок GENERATE. Тогда блок будет выглядеть следующим образом:

GENERATE (Exponential (1,0,7))

## 2 ПРИМЕР ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процедуру имитационного моделирования покажем на примере изготовления деталей разными типами станков.

Технологический процесс содержит две стадии. Первоначально производится обработка деталей на одном из двух станков типа А, затем полуфабрикаты идут на дальнейшую обработку на станок типа В. Готовые детали поступают в накопитель.

Интервалы поступления заготовок на группу станков типа А распределены согласно экспоненциальному закону с параметром  $\lambda = 28$  мин. Продолжительность обработки заготовки станком типа А составляет  $63 \pm 9$  мин (распределение равномерное), а станком типа В –  $55 \pm 5$  мин (распределение равномерное). Время транспортировки заготовки до группы станков типа А составляет  $32 \pm 10$  мин, а полуфабрикатов до станка типа В –  $15 \pm 5$  мин (распределение нормальное). Предполагается, что между двумя станциями существует неограниченная очередь.

Необходимо построить модель технологического процесса изготовления деталей, используя специализированный язык компьютерной имитации GPSS World, и определить продолжительность изготовления 50 деталей, коэффициент загрузки группы станков типа А и станка типа В, среднее значение длин очередей перед группой станков типа А и станком типа В.

### Метод построения модели

Построим блок-схему модели технологического процесса (рис. 2.1).

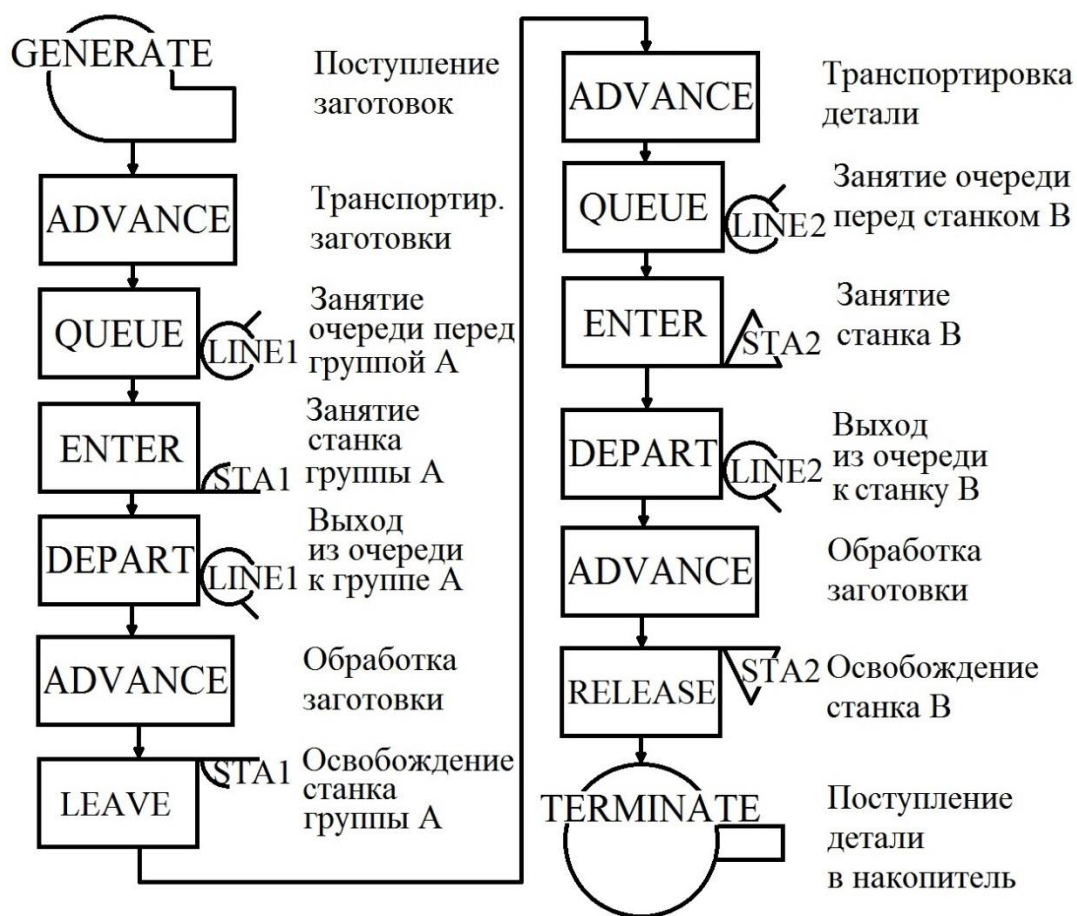


Рис. 2-1 Блок-схема имитационной модели технологического процесса изготовления деталей

Пусть транзакт представляет собой заготовку, которая по мере продвижения по модели преобразуется в готовую деталь. Поступление заготовок в соответствии с заданным распределением имитируем блоком GENERATE. Группу станков типа А моделируем многоканальным устройством STA1, т. е. двумя блоками ENTER и LEAVE, между которыми ставим блок ADVANCE для



имитации обработки заготовки. Так как станок второй группы всего один, имитируем его прибором обслуживания STA2, т. е. двумя блоками SEIZE и RELEASE. Для сбора статистики об очередях перед станками типов А и В вводим два регистратора очереди посредством блоков QUEUE и DEPART. Транспортировку заготовки до станков типа А и станка типа В моделируем блоками ADVANCE. Блок TERMINATE вводим для имитации поступления готовой детали в накопитель.

### **Подготовка модели к запуску**

Для ввода в ЭВМ в соответствии с блок-схемой пишем программу в приложении GPSS World. В меню выбираем «File» – «New» – «Model».

Для задания емкости многоканального устройства, имитирующего станки группы А, вводим оператор STORAGE. Оператор START вписываем для задания значения счетчика завершения, которое соответствует количеству требуемых деталей. Чтобы наши комментарии не считывались интерпретатором, ставим перед каждым комментарием точку с запятой. После перевода блок-схемы модели и добавления необходимых операторов программа GPSS World, подготовленная к запуску, будет выглядеть следующим образом:

STA1	STORAGE	2;	Задание станков в группе А
GENERATE	(Exponential(1,0,28));		Поступление заготовок
ADVANCE	(Normal(2,32,5));		Транспортировка заготовки
QUEUE	LINE1;		Занятие очереди перед стан-
			ками А
ENTER	STA1;		Занятие станка из группы А
DEPART	LINE1;		Освобождение очереди стан-
			ков А
ADVANCE	63,9;		Обработка на станке группы
			А
LEAVE	STA1;		Освобождение станка группы
			А
ADVANCE	(Normal(3,15,3));		Транспортировка детали
QUEUE	LINE2;		Занятие очереди перед стан-
			ком типа В
SEIZE	STA2;		Занятие станка типа В

DEPART LINE2; ка типа B	Освобождение очереди стан-
ADVANCE 55,5;	Обработка на станке типа B
RELEASESTA2 ;	Освобождение станка типа B
TERMINATE 1;	Поступление деталей в
накопитель	
START 50;	Программа выпуска

### **Запуск модели и получение результатов**

Для осуществления прогона модели необходимо в меню Command найти подменю Create Simulation.

Интерпретатор GPSS World проверит модель на наличие ошибок и запустит ее. Результаты интерпретации будут выводиться в новом окне с расширением .sim.

Для наглядности работы интерпретатора намерено допустим ошибку в исходном коде: вместо распределения Normal напишем Normalno. Результатом будет окно, показанное на рис. 2-2.

Интерпретатор поочередно пишет в журнал имитации, какие события происходят при проверке модели. В 13:53:56 им была обнаружена ошибка, по которой система остановилась. Произошло это на 4.333 секунде на 3 строке текста. Причина – невозможность найти в библиотеке функций PLUS процедуры с идентификатором Normalno.

```

05/10/17 12:23:43 Model Translation Begun.
05/10/17 12:23:43 Ready.
05/10/17 12:23:43 Simulation in Progress.
05/10/17 12:23:43 Error Stop.
05/10/17 12:23:43 Halt. XN: 1. Block 2 Next.
05/10/17 12:23:43 Clock:4.803139. Next: ADVANCE. Line 4.
05/10/17 12:23:43 ADVANCE (Normalno(2,32,5));
05/10/17 12:23:43 PLUS Procedure cannot be found.
05/10/17 12:23:43 Identifier: NORMALNO.
```

Рис. 2-2 Пример остановки интерпретатора из-за ошибки

Если же все будет верно, кроме журнала имитации система создаст стандартный файл отчета моделирования (СФО), в который будут занесены все основные результаты моделирования. Имя у него будет такое же, как у модели, а расширение – .gpr.

Отличительной частью в файл отчета по сравнению с одноканальным устройством, в том что появится раздел «**Многоканальные устройства**» (рис.2-3).

<div> <div>▲ Стандартный отчёт GPSS World.</div> <div> <div>Общая информация</div> <div>Имена</div> <div>Блоки</div> <div>Устройства</div> <div>Очереди</div> <div>Многоканальные устройства</div> <div>Текущие события</div> <div>Будущие события</div> </div> </div>	Имя / номер	Емкость памяти	Число свободных единиц памяти	Мин. число единиц памяти	Макс. число единиц памяти	Кол-во входов в память	Состояние памяти в конце
	STA1	2	0	0	2	84	1

Рис. 2-3 Раздел «Многоканальные устройства»

В данном разделе присутствуют следующие необходимые элементы:

- *Имя/номер* – название многоканального устройства;
- *Емкость памяти* – максимальная емкость многоканального устройства;
- *Число свободных единиц* – число свободных мест;
- *Минимальное число единиц памяти* – минимальное значение работающих мест;
- *Максимальное число единиц памяти* – максимальное число работающих мест;
- *Количество входов в память* – число обработанных деталей;
- *Состояние памяти в конце* – занято устройство (если 1) или нет (если 0);
- *Ср. значение занятой емкости* – среднее время обработки заготовки во всем многоканальном устройстве;
- *Коэффициент использования памяти* – коэффициент загрузки многоканального устройства.

### 3 ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

#### Описание объекта моделирования

Интервалы поступления заготовок в цех распределены согласно экспоненциальному закону со средним значением 8,5 мин. В цехе идет производство деталей, которое состоит из 3 процессов, осуществляемых автоматически. Рабочему необходимо только установить заготовку, и после обработки снять готовую де-

таль. Время, требуемое для установки и снятия одинаковое и распределено дискретно согласно табл. 3.1.

Таблица 3.1

Время установки/снятия заготовки/детали

Время установки/снятия, мин	Относительная частота
5	0,05
6	0,12
7	0,28
8	0,30
9	0,18
10	0,07

Продолжительность процессов обработки заготовок и количество доступных станков представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Время обработки и количество доступных станков

Процесс	Продолжительность, мин	Доступные станки
1	$18,3 \pm 4,6$	3
2	$27,7 \pm 13,3$	3
3	$38,5 \pm 15,4$	4

Временные интервалы технологических операций обработки распределены по **нормальному закону**.

Если все станки в группе заняты, заготовки попадают в накопители, расположенные перед каждой группой станков.

При выполнении задания данной лабораторной работы необходимо:

1. Построить модель технологического процесса, используя среду компьютерного моделирования GPSS World.

2. Используя расширенный редактор GPSS World, провести имитационные эксперименты и определить:

- количество готовых деталей за 8 часовой рабочий день;
- какую часть времени при этом загружен рабочий (в %);
- насколько загружена каждая группа станков, и какая группа наиболее загружена;
- среднее и максимальное количество заготовок, ожидавших обработки в накопителях перед станками каждой группы;
- среднюю продолжительность нахождения заготовок в накопителях.

3. Определить на сколько измениться загрузка станков каждой группы и производительность системы, если из первой группы убрать один станок.

4. Предположить, что необходимо изготовить 300 деталей. Определить сколько времени понадобится на это.

#### **4 ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет о работе должен содержать:

1. Задание и исходные данные по лабораторной работе.
2. Модель в виде программы в среде компьютерного моделирования GPSS World (файл .gps).
3. Результаты имитационных экспериментов.

#### **5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как задается многоканальное устройство в GPSS-модели?
2. Какие параметры о многоканальном устройстве выводятся в стандартном файле отчета моделирования?
3. Что такое «Счетчик завершений» в GPSS-модели?
4. Какой управляющий оператор в GPSS-модели устанавливает значение «Счетчика завершений»?
5. Какой блок изменяет значение «Счетчика завершений» в GPSS-модели?
6. Что такое коэффициент использования прибора обслуживания и как он определяется в GPSS-модели?

#### **6 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Зиновьев В. В. Моделирование процессов и систем учебное пособие / В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, П. И. Николаев // – КузГТУ : Кемерово, 2016 – 146 с.