

# Технология и технологические машины



**ДОДОНОВ**

**Владимир Владимирович**  
кандидат технических наук,  
доцент  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**DODONOV**

**Vladimir Vladimirovich**  
Candidate of Engineering  
Sciences, Assoc. Prof.  
(MSTU named  
after N.E. Bauman)

УДК 621.941:519.876.5

## **Имитационное моделирование автоматизированных станочных систем**

**В.В. Додонов**

*Рассмотрены вопросы использования имитационного моделирования в среде GPSS автоматизированного станочного оборудования, автоматизированных станочных систем (АСС), робототехнических комплексов (РТК). Описана методика разработки модели проектируемой системы и использования для ее исследования аппарата имитационного моделирования. Приведены примеры расчета и моделирования проектируемых АСС, рекомендации по их моделированию, специфике расчетов, а также результаты моделирования реального РТК.*

**Ключевые слова:** автоматизированные станочные системы, имитационное моделирование.

## **Simulation modeling of automated machine systems**

**V.V. Dodonov**

*The problems of using the simulation modeling in the GPSS environment of the automated equipment, automated machine systems (ASS), robotics complexes (RTK) are considered. The method for developing the model of the designed system and using the simulation modeling device for its research is described. Examples of calculation and modeling of projected ASS, recommendations on their modeling, specific character of calculations are given, results of the real RTK modeling are presented.*

**Keywords:** automated machine systems, simulation modeling.

**И**митационное моделирование — метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей функционирование реальной системы, и над моделью проводятся компьютерные эксперименты с целью получения информации об этой системе. Процесс экспериментирования с моделью называется имитацией функционирования системы.

Имитационное моделирование [1] используют когда:

- натурные эксперименты на реальном объекте не желательны ввиду их трудоемкости и зачастую высокой стоимости;
- невозможно построить аналитическую модель: в системе есть время, причинные связи, последствие, нелинейности, стохастические (случайные) переменные;
- необходимо выявить поведение исследуемой системы во времени.

Для имитации псевдослучайных событий используют генераторы случайных чисел. В среде GPSS для этого существуют два блока — GENERATE и ADVANCE. Генератор случайных чисел в системе GPSS может работать по более чем 20 законам распределения: равномерный закон, экспоненциальный закон, нормальный закон, пуассоново распределение и т. д. — и неограниченному числу пользовательских настраиваемых законов.

При построении модели в среде GPSS по умолчанию (без явного определения иного) используется закон равномерного распределения, особенно это эффективно на ранней стадии проектирования системы, когда создается структура самой системы. Однако по мере усложнения модели может потребоваться введение других законов распределения [2].

Постановка задачи — этап содержательного описания процесса моделирования с указанием числовых значений работы тех или иных составляющих исследуемого процесса. На этом этапе указывается что необходимо определить. Исследование самых разнообразных систем и процессов методом имитационного моделирования заключается в определении происходящих в системе событий. Чтобы облегчить это определение целесообразно первоначально

графически изобразить процесс функционирования системы и выделить в нем характерные события.

Основными элементами системы моделирования GPSS являются стандартные компоненты реальных систем и процессов: каналы обслуживания (приборы), очереди, накопители, переключатели, требования и др. Достаточный набор подобных компонентов и программная реализация их функционирования позволяют моделировать самые разнообразные системы и процессы. Использование же элементами системы количественных параметров в виде констант, переменных, функций, сохраняемых величин позволяет исследовать большое многообразие систем [3].

На следующем этапе выявляют основные особенности моделируемой системы:

- характер функционирования системы (непрерывная или дискретная система);
- потоки поступления требований в систему (регулярные, случайные или смешанные);
- число требований, поступающих в один момент времени (ординарный или неординарный поток);
- характер взаимодействия смежных требований в потоке (с последствием или нет);
- характер поведения требований, поступающих в систему на обслуживание (с отказом, с ограниченным ожиданием или с ожиданием без ограничения);
- способ выбора требований на обслуживание (с приоритетом, по мере поступления, случайно, последний обслуживается первым). Иногда в таком случае говорят о дисциплине обслуживания;
- время обслуживания требований (детерминированное или случайное);
- число каналов обслуживания (одноканальная или многоканальная система);
- число фаз обслуживания (однофазная или многофазная система);
- однородность требований, поступающих на обслуживание (однородные и неоднородные);
- связь выходных и входных потоков (замкнутая или разомкнутая система).

На этом этапе следует определить продолжительность моделирования системы, выбрать

способы представления тех или иных данных. Здесь же осуществляется декомпозиция сложного моделируемого процесса на ряд простых сегментов, чтобы их описание могло быть выполнено достаточно просто и наглядно. При это следует максимально использовать встроенные процедуры, имеющиеся в системе. Это значительно упрощает процесс построения и исследования модели.

Следующий этап — подготовка исходных данных для выбора варианта робототехнического комплекса (РТК). Рассмотрим процесс выбора РТК подробнее. Для использования любого метода анализа характеристик РТК необходимо усреднить время обслуживания детали каждым технологическим оборудованием. Поскольку используется готовое оборудование, то известны его характеристики и можно оценить время обслуживания детали этим оборудованием.

В качестве примера такой оценки рассмотрим табл. 1. В первом столбце перечислены детали, которые будут обрабатываться на будущем РТК (для простоты детали просто пронумерованы). В первой строке перечислено оборудование, которое будет использоваться в этом РТК. На пересечении номера детали и конкретного оборудования стоит время обслуживания детали данным оборудованием. В последней строке дано среднее время обслуживания детали на конкретном оборудовании и разброс времени обслуживания. Значения среднего времени обслуживания и его разброс вычисляются методами математической статистики [3, 4].

Таблица 1

Определение среднего времени обслуживания детали, с

Деталь	ГПМ 1	ГПМ 2	...	Робот
1	5	12	...	0,2
2	7	15	...	0,4
...	...	...	...	...
N	10	16	...	0,3
Среднее значение	$7,5 \pm 2,5$	$14 \pm 2$	...	$0,3 \pm 0,1$

Исходные данные (см. табл. 1) готовы. Осталось выбрать математическую модель, которая поможет нам из всех вариантов РТК выбрать оптимальный, и провести расчет по выбранной математической модели.

При выборе математической модели необходимо сказать несколько слов об особенностях их работы. Математическая модель служит для описания связи между входными и выходными параметрами изучаемого объекта. В нашем случае математическая модель будет связывать входные и выходные параметры РТК. Входными параметрами РТК являются:

- структура РТК;
- среднее время обслуживания детали оборудованием и т. д.

Выходными параметрами РТК являются:

- производительность РТК;
- загрузка оборудования;
- емкость магазинов (заготовок, деталей, инструмента) и т. д.

Любая математическая модель имеет две характеристики:

- 1) степень приближения полученных результатов к реальности;
- 2) трудоемкость вычислений (рис. 1).

Простые математические модели позволяют быстро оценить выходные параметры РТК, однако полученная оценка получится грубой. Сложная математическая модель даст более точные результаты, но процесс вычислений может занять длительное время. Другим недостатком сложных математических моделей является тот факт, что при расчете от проектировщика может потребоваться знание таких параметров рассчитываемого объекта (в нашем случае РТК), которые у проектировщика являются выходными [5].

Модель РТК составляется на основании структуры и характеристики моделируемого



Рис. 1. Достоинства и недостатки математической модели РТК

объекта или системы. Рассмотрим РТК, представленную на рис. 2.

известны (паспортные данные, результаты экспериментов, исследований).

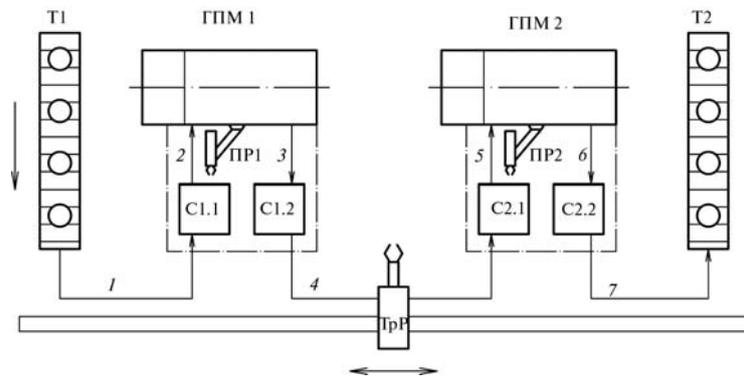


Рис. 2. Структура проектируемого РТК:

Т1 — транспортер, по которому заготовки поступают в РТК на обработку; Т2 — транспортер, по которому обработанные заготовки убывают из РТК; ГПМ1, ГПМ2 — гибкие производственные модули;

ТрР — транспортный робот; ПР1, ПР2 — перегрузочные роботы при ГПМ1 и ГПМ2; С1.1, С2.1 — столы для необработанных заготовок для ГПМ1 и ГПМ2; С1.2, С2.2 — столы для обработанных заготовок для ГПМ1 и ГПМ2

Последовательность работы РТК:

- по транспортеру Т1 заготовки прибывают на РТК;
- транспортный робот ТрР забирает заготовку с транспортера Т1 и ставит ее на стол С1.1;
- когда ГПМ1 свободен, перегрузочный робот ПР1 берет заготовку со стола С1.1 и ставит ее в ГПМ1;
- заготовка обрабатывается на ГПМ1;
- после того, как заготовка будет обработана на ГПМ1, робот ПР1 заберет ее из ГПМ1 и поставит на стол С1.2;
- транспортный робот ТрР забирает обработанную на ГПМ1 заготовку со стола С1.2 и переносит ее на стол С2.1;
- когда ГПМ2 свободен, перегрузочный робот ПР2 забирает деталь со стола С2.1 и ставит ее в ГПМ2;
- заготовка обрабатывается на ГПМ2;
- после обработки заготовки на ГПМ2 робот ПР2 забирает обработанную заготовку из зоны обработки ГПМ2 на стол С2.2;
- транспортный робот ТрР забирает обработанную заготовку со стола С2.2 и ставит ее на транспортер Т2;
- по транспортеру Т2 заготовки убывают из рассматриваемой РТК на склад (в ГПС сборки и пр.)

При проектировании РТК используется готовое технологическое оборудование, технические характеристики и возможности которого

Были проведены натурные эксперименты с целью получения среднего времени срабатывания механизмов и работы ГПМ. Для проектируемого РТК известны следующие временные параметры (табл. 2).

Таблица 2

Параметры проектируемого РТК

Переходы работы РТК	Этапы перехода	Действие	Среднее время, с
I	1	Робот ТрР захватывает деталь из Т1	$8 \pm 1$
	2	Робот ТрР перемещается к столу С1.1	6
	3	Робот ТрР ставит заготовку на С1.1	$3 \pm 1$
II	1	ПР1 устанавливает заготовку в рабочую зону ГПМ1	$3 \pm 1$
	2	Заготовка обрабатывается на ГПМ1	$60 \pm 10$
III		ПР1 забирает заготовку из ГПМ1 и ставит на стол С1	$3 \pm 1$
IV	1	Робот берет заготовку со стола С1.2	$8 \pm 1$
	2	Робот перемещается к столу С2.1	7
	3	Робот ставит заготовку на стол С2.1	$8 \pm 1$
V	1	ПР2 устанавливает заготовку в рабочую зону ГПМ2	$3 \pm 1$
	2	Заготовка обрабатывается на ГПМ2	$100 \pm 15$

Переходы работы РТК	Этапы перехода	Действие	Среднее время, с
VI		PP2 забирает заготовку из ГПМ2 и ставит на стол C2.2	3±1
VII	1	Робот ТрР берет заготовку со стола C2.2	8±1
	2	Робот ТрР перемещается к транспортеру Т2	5
	3	Робот ТрР устанавливает заготовку на транспортер Т2	8±1

Модель РТК на языке GPSS приведена на рис. 3.

Полное время работы РТК — 11487,355 единиц модельного времени. За единицу модельного времени принята 1 с, значит время работы РТК — 3 ч 11 мин 28 с.

За время работы системы:

- устройство MACHINE1 (ГПМ1) сработало 76 раз — 76 заготовок было обработано, среднее время работы ГПМ1 — 66,317 с, коэффициент загрузки ГПМ1 — 0,439, задержек по обработке не было (DELAY=0);

- устройство MACHINE2 (ГПМ2) сработало 75 раз — 75 заготовок было обработано, среднее время работы ГПМ2 — 105,646 с, коэффициент загрузки ГПМ2 — 0,690, задержек по обработке не было;

- устройство ROBOT (ПР) сработало 227 раз — 76 заготовок было перенесено от Т1 к ГПМ1, 76 заготовок было перенесено от ГПМ1 к ГПМ2, 75 заготовок было перенесено от ГПМ2 к Т2, среднее время работы ПР — 20,194 с, коэффициент загрузки ПР — 0,399, задержек по транспортировке не было;

- во всех очередях было максимально по одной заготовке.

### Литература

1. <http://ru.wikipedia.org>, данные, актуальные на 25.12.2011.
2. Имитационное моделирование автоматизированных станочных комплексов: Методические указания к лабораторной работе по курсу «Проектирование автоматизированных станочных комплексов» / Под ред. Г.Н. Васильева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 20 с.

```

GENERATE 150 ;Заготовка прибывает на транспортер
QUEUE One ;Войти в регистратор очереди 1
SEIZE Robot ;Попытка занять Робот
DEPART One ;Покинуть регистратор очереди 1
ADVANCE 8,1 ;Робот захватывает деталь из Т1
ADVANCE 6 ;Робот перемещается к столу C1.1
ADVANCE 3,1 ;Робот ставит заготовку на C1.1
RELEASE Robot ;Освободить Робот
QUEUE Two ;Войти в регистратор очереди 2
SEIZE Machine1 ;Попытка занять ГПМ1
DEPART Two ;Покинуть регистратор очереди 2
ADVANCE 3,1 ;ПР1 устанавливает заготовку в рабочую зону ГПМ1
ADVANCE 60,10 ;Заготовка обрабатывается на ГПМ1
ADVANCE 3,1 ;ПР1 забирает заготовку из ГПМ1 и ставит на стол C1.2
RELEASE Machine1 ;Освободить ГПМ1
QUEUE Three ;Войти в регистратор очереди 3
SEIZE Robot ;Попытка занять робота
DEPART Three ;Покинуть регистратор очереди 3
ADVANCE 8,1 ;Робот берет заготовку со стола C1.2
ADVANCE 9,1 ;Робот перемещается к столу C2.1
ADVANCE 8,1 ;Робот ставит заготовку на стол C2.1
RELEASE Robot ;Освободить Робот
QUEUE Four ;Войти в регистратор очереди 4
SEIZE Machine2 ;Попытка занять ГПМ2
DEPART Four ;Покинуть регистратор очереди 4
ADVANCE 3,1 ;ПР2 устанавливает заготовку в рабочую зону ГПМ2
ADVANCE 100,15 ;Заготовка обрабатывается на ГПМ2
ADVANCE 3,1 ;ПР2 забирает заготовку из ГПМ2 и ставит на стол C2.2
RELEASE Machine2 ;Освободить ГПМ2
QUEUE Five ;Войти в регистратор очереди 5
SEIZE Robot ;Попытка занять Робот
DEPART Five ;Покинуть регистратор очереди 5
ADVANCE 8,1 ;Робот берет деталь со стола C2.2
ADVANCE 5 ;Робот перемещается к транспортеру Т2
ADVANCE 8,1 ;Робот устанавливает деталь на транспортер Т2
RELEASE Robot ;Освободить Робот
TERMINATE 1 ;Деталь обработана
    
```

Рис. 3. Модель РТК на языке GPSS

3. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2004. 320 с. (Сер. Проектирование).

4. Методические указания для слушателей ФПКП по моделированию систем и сетей связи на GPSS/PC. Ч. 1. Основы моделирования на GPSS/PC / Составители: Л.А. Воробейчиков, Г.К. Сосновиков. Москва, 1993.

5. Программное обеспечение GPSS World Student.

### References

1. Available at: <http://ru.wikipedia.org> (accessed 25 December 2011).

2. *Imitatsionnoe modelirovanie avtomatizirovannykh stanochnykh kompleksov: Metodicheskie ukazaniia k laboratornoi rabote po kursu «Proektirovanie avtomatizirovannykh stanochnykh kompleksov»* [Simulation modeling of machine automation systems: Guidelines to the lab for the course «Design of automated machine tool systems»]. Edited G.N. Vasil'eva. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman Publ., 2004. 20 p.

3. Kudriavtsev E.M. GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniia razlichnykh system [Fundamentals of simulation of various systems]. Moscow, DMC Press publ., 2004. 320 p.

4. Metodicheskie ukazaniia dlia slushatelei FPKP po modelirovaniu sistem i setei sviazi na GPSS/PC [Guidelines for students FPKP modeling systems and networks on GPSS / PC]. Ch. 1. Osnovy modelirovaniia na GPSS/PC [part 1 Modeling framework for GPSS / PC] Sostaviteli: L.A. Vorobeichikov, G.K. Sosnovikov, Moscow, 1993.

5. Programmnoe obespechenie [Software] GPSS World Student.

Статья поступила в редакцию 20.09.2012

### Информация об авторе

ДОДОНОВ Владимир Владимирович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: chetvernin@inbox.ru).

### Information about the author

DODONOV Vladimir Vladimirovich (Moscow) — Candidate of Engineering Sciences, Assoc. Prof. «Metal-Cutting Equipment» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: chetvernin@inbox.ru).