

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

© 2012 В. А. Зеленский, В. П. Коннов, А. И. Щодро

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Имитационное моделирование производственных процессов позволяет сократить время разработки технологической документации, снизить производственные издержки, сделать оптимальный выбор оборудования, повысить производительность труда. Показано, что использование аппарата сетей Петри позволяет создать моделирующую среду и описать основные параметры производственного процесса. Приведен пример решения оптимизационной задачи.

*Имитационное моделирование производственных процессов, сети Петри, моделирующая среда, производственный цикл*

Моделирование производственных процессов позволяет сократить сроки разработки технологических документов (маршрутных, операционных карт и др.), снизить стоимость разработки производственных линий, оптимальным образом выбрать оборудование, повысить производительность труда. Проблема моделирования производственных процессов заключается в том, что они трудно поддаются формальному описанию [1]. Создать имитационную модель производственного процесса в парадигме системной динамики или агентного моделирования на практике оказывается чрезвычайно сложно. Более целесообразно использование дискретно-событийной парадигмы имитационного моделирования, позволяющей решить актуальную задачу создания и анализа модели производственного процесса [2, 3].

Производственный процесс определяется как совокупность действий работников и орудий труда, в результате которых сырьё, материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия, поступающие на предприятие, превращаются в готовую продукцию в заданном количестве, с требуемым качеством и в установленные сроки. Производственный процесс состоит из основных, вспомогательных и обслуживающих процессов. Основными процессами считаются технологические

процессы, в ходе которых происходят изменения геометрических форм, размеров и физико-химических свойств продукции. Под вспомогательными процессами будем понимать процессы, которые обеспечивают бесперебойное протекание основных процессов. Существуют также обслуживающие процессы, связанные с обслуживанием как основных, так и вспомогательных процессов и не создающие продукцию (хранение, транспортировка, технический контроль и т.д.).

Иерархия парадигмы, математического аппарата и инструментария имитационного моделирования показаны на рис. 1.

В качестве математического аппарата имитационного моделирования предлагается использовать сети Петри [4]. Сети Петри характеризуются: качественным описанием, количественными компонентами и функциями сети, начальной маркировкой сети, функцией переходов. Будем рассматривать ординарные автоматные сети Петри, не содержащие вложений и не оперирующие разнородными метками [5]. Геометрически данные сети отображаются двудольным планарным ориентированным графом, который не содержит кратных дуг, не содержит пересекающихся дуг, не содержит петель, содержит один или несколько циклов. Количественные компоненты и функции

сети Петри, можно представить в виде набора переменных  $\{P, T, I, O\}$ , где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  – множество мест (позиций);  $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$  – множество переходов;  $I$  – входная функция сети;  $O$  – выходная функция сети.

Входная и выходная функция сети могут быть заданы в виде матриц инцидентности, строками которых являются

номера переходов, а столбцами – номера мест. Если переход  $i$  инцидентен месту  $j$  – значением элемента матрицы с индексами  $ij$  будет «1», в противном случае – «0». Таким образом, матрицы входной и выходной функции сети являются булевыми матрицами, что упрощает операции с ними.



Рис. 1. Парадигма, математический аппарат и инструментарий имитационного моделирования

Начальная маркировка (разметка) сети определяется количеством и расположением меток (называемых также фишками) и выбирается случайно с равной степенью вероятности относительно множества мест  $P$ . Предполагается, что метки

однородны и инвариантны к функциям сети. В автоматных сетях Петри, которые мы рассматриваем, общее количество меток после срабатывания перехода всегда равно их первоначальному количеству (рис. 2).

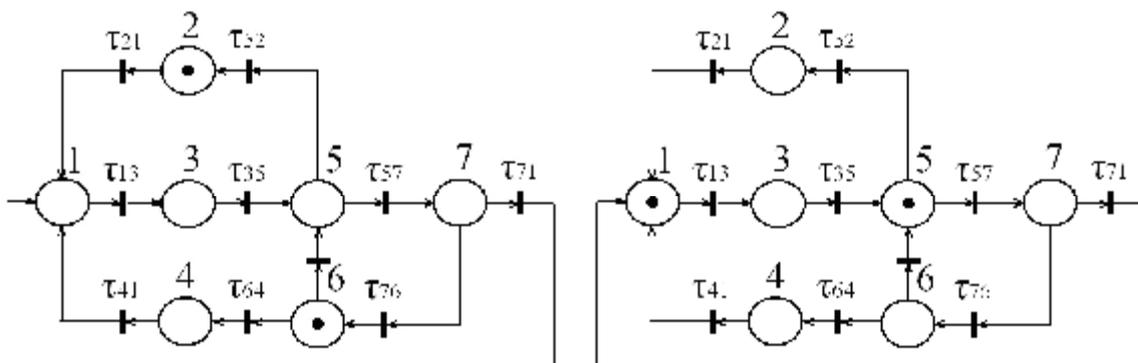


Рис. 2. Сеть Петри до и после срабатывания переходов

Переход разрешен, если каждое его входное место содержит не менее одной метки. Правило выполнения (срабатывания) переходов состоит в том, что сработать может только разрешенный переход, при этом выбор выполняемого перехода производится равновероятно относительно общего количества разрешенных переходов. При выполнении перехода из каждого его входного места изымается по одной метке, а в каждое выходное место добавляется по одной. Для автоматных сетей данное правило упрощается, т.к. каждый переход имеет только одно входное и одно выходное место.

В качестве инструмента для реализации аппарата сетей Петри выбрана программа *HPSim* компании *Henryk Anschuetz*. Программа написана на *Visual C++*, предполагает возможность визуального программирования и поддерживает классические сети Петри. Распространяется в соответствии с лицензией *GNU General Public License*.

Интерфейс выполнен в привычном для пользователя оконном стиле, предоставляется набор инструментов для визуального программирования, а также сред-

ства загрузки, редактирования и хранения результатов. Исследование состоит из двух этапов – создание модели производственного процесса в программной среде и выполнение имитационного эксперимента. Анализ результатов моделирования целесообразно проводить методом Монте-Карло.

Рассмотрим примеры создания и анализа производственных процессов в программной среде *HPSim*. На рис. 3 в упрощенном виде представлена модель производства кровельного материала (черепицы). Готовый продукт получается из четырех основных ингредиентов – цемента, песка, пигмента и воды. Требуемый вид черепицы придается на формообразующем станке. После этого партия черепицы укладывается на поддон и поступает в пропарочную камеру. Далее происходит распалубка, в результате чего на выходе процесса получают готовые изделия, а пустой поддон возвращается в технологический цикл. Производительность линии определяется количеством пустых поддонов и скоростью их подготовки для работы с новой партией черепицы.

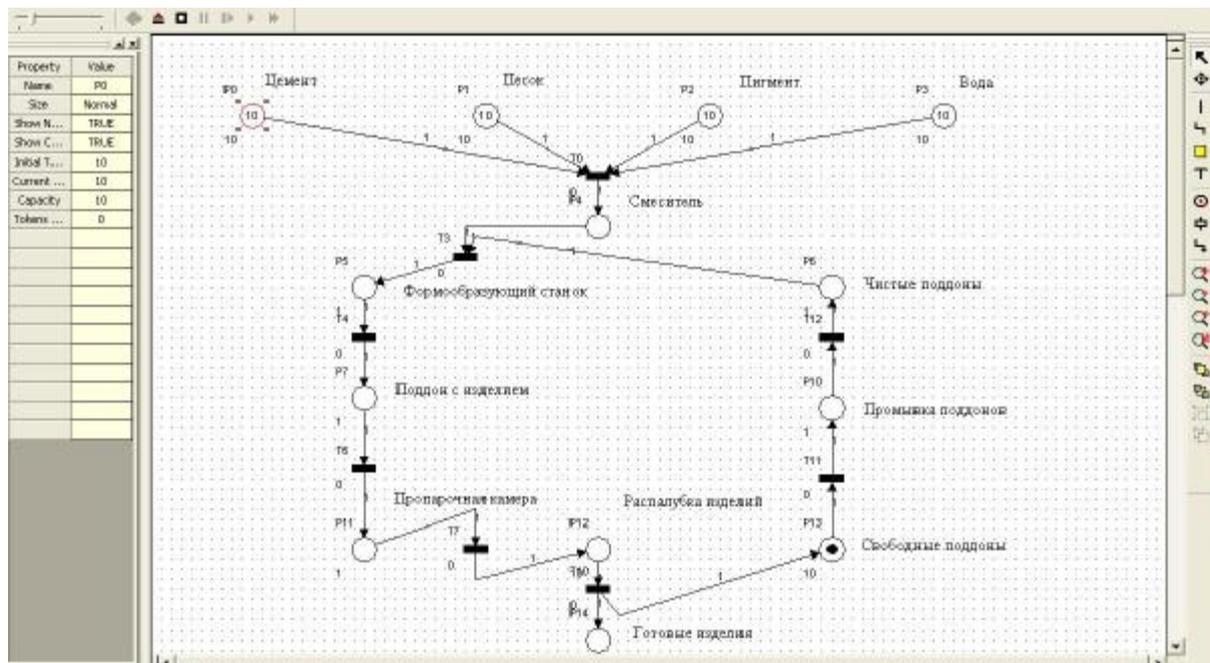


Рис. 3. Имитационная модель процесса производства черепицы

Результаты имитационного эксперимента представлены в табл. 1. Из результатов эксперимента следует, что затраты на оборудование не приводят к по-

стоянному росту производительности линии. Так, например, для данных условий эксперимента оптимальное количество используемых поддонов равно четырем.

Таблица 1. Результаты эксперимента с кровельным материалом

Количество поддонов, шт	1	2	3	4	5	6
Производительность, партия/ед. времени	73	39	29	26	26	26

На рис. 4 представлена другая модель производственного процесса – ремонт и восстановление сложных технических изделий.

его разборки дифференцируются на годные, дефектные и требующие ремонта. Понятно, что процент годных, дефектных и требующих ремонта сборочных единиц – величина случайная. Количество восстановленных изделий также зависит от наличия запасных частей на складе ремонтного предприятия.

Требующее ремонта изделие после необходимой подготовки диагностируется на предмет соответствия параметрам: герметичность, давление и производительность. Составные части изделия после

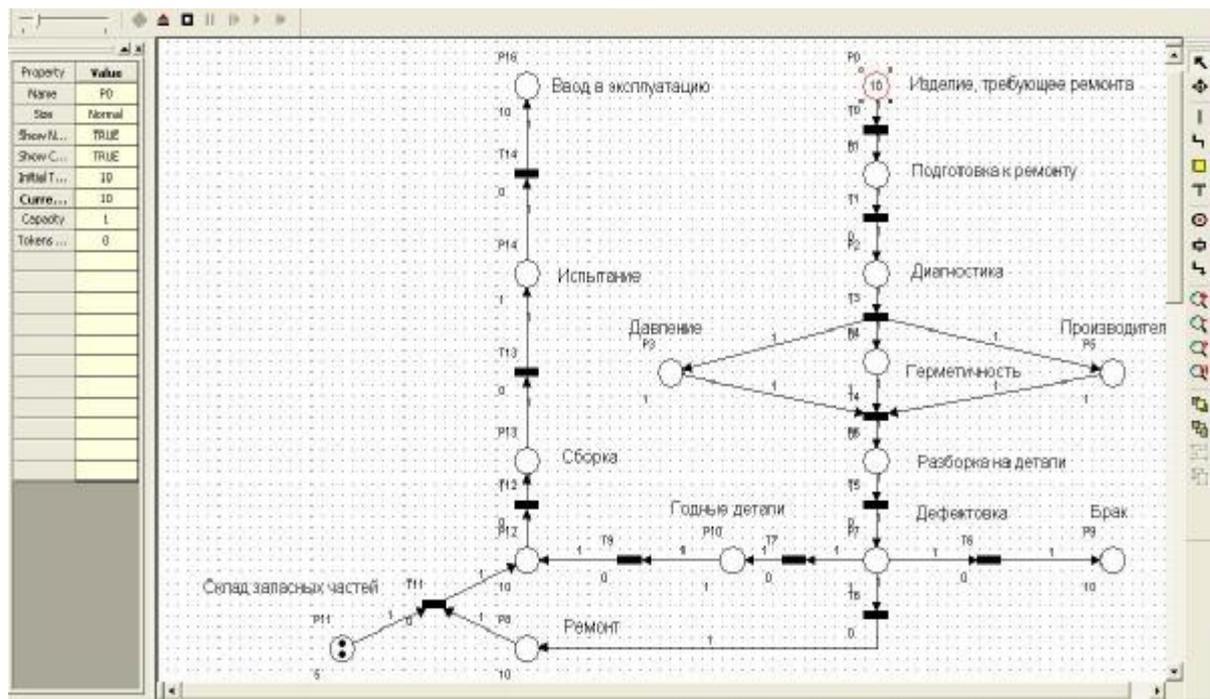


Рис. 4. Имитационная модель процесса ремонта сложных технических изделий

Результаты имитационного эксперимента представлены в табл. 2. Из результатов эксперимента следует, что постоянный рост затрат на увеличение количества запасных частей на складе не приводит к увеличению процента восстановленных

изделий. Так, например, для данных условий эксперимента оптимальное количество деталей на складе равно трем. При дальнейшем увеличении этого параметра среднее количество изделий, введенных в эксплуатацию не превышает число 6,5.

Таблица 2. Количество сложных технических изделий, введенных в эксплуатацию

Количество запчастей на складе, шт	Номер имитационного эксперимента										Среднее кол-во запчастей, шт
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	5	3	2	3	4	6	3	4	5	4	3,9
2	6	4	3	4	5	6	4	6	5	5	4,8
3	7	4	4	5	7	7	5	7	5	6	6,4
4	8	5	5	6	7	8	7	8	6	7	6,5
5	8	4	6	7	6	7	6	7	7	7	6,4

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выбранная парадигма моделирования, математический аппарат и инструментальное средство позволяют производить имитационное моделирование и анализ производственных процессов, решать оптимизационные задачи.

2. Преимуществом заявленного подхода является обоснованность выбора дискретно-событийной парадигмы моделирования, универсальность и гибкость математического аппарата, использование свободного программного обеспечения, поддерживающего визуальное программирование.

3. Полученные результаты могут быть использованы в научно-исследовательской работе, в учебном процессе, а также стать предметом коммерциализации научной деятельности.

#### Библиографический список

1. Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS – технологии [Текст] / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. - М.: Изд-во МВТУ

им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

2. Зеленский, В.А. Выбор парадигмы, математического аппарата и инструментов моделирования технологических процессов в машиностроении и нефтегазовой промышленности [Текст] / В.А. Зеленский, В.П. Коннов, А.И. Щодро // Материалы IV Всероссийской НПК с международным участием «Математическое моделирование, численные методы и информационные системы». – Самара: Изд-во СМиУ, 2012. – С. 113 - 120.

3. Зеленский, В.А. Моделирование технологических процессов с помощью сетей Петри [Текст] / В.А. Зеленский, В.П. Коннов, А.И. Щодро // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. - С. 286 - 290.

4. Петерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст] / Дж. Петерсон. – М.: Мир, 1984. – 412 с.

5. Голубятников, И.В. Системы мониторинга сложных объектов [Текст] / И.В. Голубятников, В.А. Зеленский, В.Е. Шатерников – М.: Машиностроение, 2009. – 172 с.

## **SIMULATION OF OPERAITING CYCLE BY PETRY NETS**

© 2012 V. A. Zelenskiy, V. P. Konnov, A. I. Schodro

Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolyov  
(National Research University)

Simulation of operating cycles let curtail develop technology documents time, reduce working losses, make selection equipment optimum, develop flow rate of work. The use of planning and control techniques based on Petri net allows creating modeling system and defining main parameters of process. An example of a problem solution is given.

*Simulation of operation cycle, Petri net, modeling system, flow rate of work.*

### **Информация об авторах**

**Зеленский Владимир Анатольевич**, профессор кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vaz-3@mail.ru](mailto:vaz-3@mail.ru). Область научных интересов: имитационное моделирование, информационно-измерительные системы, элементы систем управления.

**Коннов Вадим Петрович**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vl.z@mail.ru](mailto:vl.z@mail.ru). Область научных интересов: имитационное моделирование, информационно-измерительные системы, элементы систем управления.

**Щодро Артём Игоревич**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vl.z@mail.ru](mailto:vl.z@mail.ru). Область научных интересов: имитационное моделирование, информационно-измерительные системы, элементы систем управления.

**Zelenskiy Vladimir Anatolyevich**, professor of radio devices design department, Dr. Sci. tech., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vaz-3@mail.ru](mailto:vaz-3@mail.ru). Area of research: simulation, information-measuring device systems, units of management systems.

**Konnov Vadim Petrovich**, aspirant of radio devices design department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vl.z@mail.ru](mailto:vl.z@mail.ru). Area of research: simulation, information-measuring device systems, units of management systems.

**Schodro Artyom Igorevich**, aspirant of radio devices design department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vl.z@mail.ru](mailto:vl.z@mail.ru). Area of research: simulation, information-measuring device systems, units of management systems.