

# НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

А. Н. Сочнев

*ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»*

Поступила в редакцию 01.03.2013 г.

**Аннотация.** Представленная статья содержит результаты анализа и исследования существенных вопросов формирования сетевых имитационных моделей дискретного производства. Обоснована необходимость использования иерархической системы управления, приведены модели типичных производственных модулей, выбраны наиболее рациональные пути представления возмущений в модели. Результаты могут быть применены в практике создания систем управления производством с эталонной моделью, соответствующих современным требованиям к качеству управления.

**Ключевые слова:** имитационная модель, иерархическая сеть Петри, функциональное моделирование, стохастичность моделей, стандартизация моделей.

**Annotation.** The submitted article contains the research results and analysis of major issues of network simulation models formation of discrete manufacturing. The necessity of hierarchical control systems using, the model shows the typical production of modules, choose the most effective ways to present disturbances in the model. The results can be applied in practice, a production control systems with the reference model, in line with modern requirements for quality control.

**Keywords:** simulation model, the hierarchical Petri nets, functional simulation, stochastic modeling, standardization models.

## ВВЕДЕНИЕ

Накопленный к настоящему времени опыт создания систем управления производством определил наиболее эффективные инструменты для их формирования. Задачи предварительного планирования производства и диспетчерского управления решаются, как правило, с применением эталонных имитационных моделей производственного процесса. Имитационные модели позволяют вместе с планированием провести исследование качественных характеристик функционирования системы по вариантам AS-IS (как есть) и TO-BE (как должно быть).

Подобные модели могут быть сформированы с использованием специализированных программных продуктов, например ARIS, Arena или подобных им, либо с использованием универсальных математических инструментов, например формализмов сетей Петри.

Анализ результатов применения сетей Петри позволяет сделать вывод, что некоторые

вопросы, связанные с этим процессом, могут быть описаны и систематизированы отдельной статьей.

## 1. ИЕРАРХИЧНОСТЬ МОДЕЛЕЙ

Известно, что системы управления сложными объектами в общем случае рекомендуется формировать по иерархическому принципу, состоящими из трёх уровней управления: верхнего (стратегического), среднего (тактического) и нижнего (исполнительного). Как указывалось выше, управление производственными системами может осуществляться на основе эталонных имитационных моделей. Следовательно, логичным является использование для формирования подобных моделей многоуровневых иерархических структур.

В теории сетей Петри существуют виды сетей, адекватно представляющие иерархические системы, например иерархические сети Петри-инложенные сети Петри [1].

Иерархические сети позволяют рассматривать отдельные переходы как новые сети Петри на более низком уровне управления (рис. 1). Количество уровней вложения теоретически не

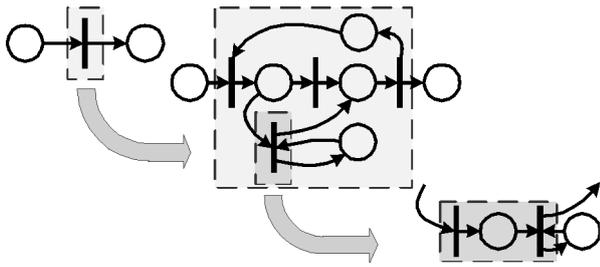


Рис. 1. Пример структуры иерархической сети Петри

ограничено. Для моделирования производственных систем, как правило, достаточно трех уровней в соответствии с принципами управления сложными системами.

Вложенные сети Петри представляют собой расширение стандартного формализма сетей Петри, при котором маркеры, определяющие разметку сети, сами являются маркированными сетями. Сетевые фишки во вложенной сети моделируют объекты, которые могут иметь самостоятельное поведение, а также взаимодействовать с внешним окружением и между собой.

В моделях производственных систем вложенные сети могут использоваться для хранения в маркере модели технологического процесса. Иначе говоря, они удобны для отображения типичных технологических документов, например маршрутных карт или управляющих программ числового управления.

## 2. МОДУЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ МОДЕЛЕЙ

Основными особенностями, характеризующими производственные системы является сравнительно небольшое количество производственных элементов, типов технологических операций, а также значительная номенклатура производимой продукции, которая может включать в некоторых случаях до тысяч единиц [2]. Эти обстоятельства требуют решения задачи согласованного управления производственным оборудованием с целью координации взаимодействия различных объектов в рамках системы.

Небольшое количество типов производственных элементов приводит к возникновению идеи синтеза структуры модели дискретного производства из типовых модулей [3, 4]. Принцип модульного построения заключается в выделении топологически устойчивых фраг-

ментов моделей производственных систем. Такой фрагмент определяется как типовой модуль, размерность и межмодульные связи которого зависят от решаемой задачи.

Так как производственная система оперирует большим количеством объектов, имеющих однотипные или схожие траектории движения через систему, то, очевидно, что отдельные участки функционируют циклически. Типовыми элементами производственной системы являются накопитель, станок, ячейка и т.д.

**Пример 1.** Модель накопителя емкостью  $n$  объектов.

В сетевой модели накопитель представляется следующей структурой (рис. 2).

Интерпретация элементов модели:  $t1$  - операция перемещения в накопитель,  $t2$  - операция перемещения из накопителя,  $p1$  - объекты в накопителе.

Матрицы инцидентий и начальная маркировка сети:

$$D^- = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ n & 0 \end{bmatrix},$$

$$D^+ = \begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} n & -1 \\ -n & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mu = [0 \quad n].$$

**Пример 2.** Модель обрабатывающего агрегата (рис. 3).

Интерпретация элементов модели:  $t1$  - операция установки заготовки,  $t2$  - операция обработки,  $t3$  - операция удаления готового изделия,  $t4$  - операция переналадки агрегата,  $p1$  - заготовки до обработки,  $p2$  - готовые изделия,  $p3$  - требование переналадки,  $p4$  - переналадка завершена.

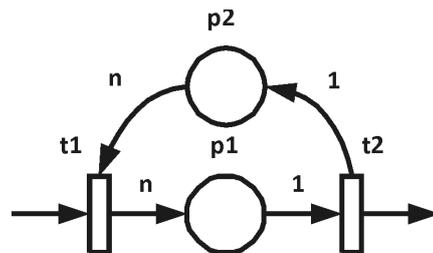


Рис. 2. Модель буферного элемента с ограниченной емкостью

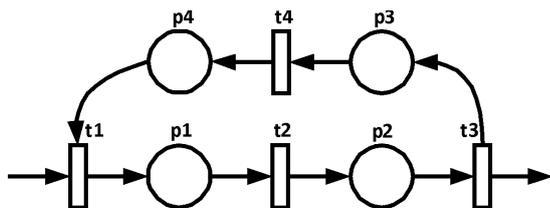


Рис. 3. Модель обрабатывающего элемента с ограниченной производительностью

Матрица инцидентий и начальная маркировка сети:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mu = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

### 3. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Известными, стандартными и достаточно популярными инструментами функционального моделирования являются методы семейства IDEF [5]. С их помощью можно эффективно отображать и анализировать модели деятельности широкого спектра сложных систем в различных разрезах. В настоящий момент из семейства IDEF можно выделить стандарт IDEF0 - методологию функционального моделирования. Как правило, моделирование средствами IDEF0 является первым этапом изучения любой системы.

Методология IDEF0 имеет несколько базовых понятий, которые целесообразно использовать и в моделях на основе сетей Петри. Первое понятие – декомпозиция. Принцип декомпозиции применяется при разбиении сложного процесса на составляющие его функции. При этом уровень детализации процесса определяется непосредственно разработчиком модели.

Декомпозиция позволяет постепенно и структурированно представлять модель системы в виде иерархической структуры отдельных диаграмм, что делает ее менее перегруженной и легко усваиваемой.

Второе важное понятие методологии функционального моделирования – использование функциональных блоков, построенных по при-

нципу ICOM (I–Вход (Input), C–Управление (Control), O–Выход (Output), M–Механизм (Mechanism)). С каждым функциональным блоком связаны входная, выходная дуги, а также управляющая и ресурсная (рис. 4).

Функциональный блок по требованиям стандарта должен иметь по крайней мере одну управляющую интерфейсную дугу и одну исходящую.

Вопрос трансформации функциональных моделей в динамические модели на основе сетей Петри неизбежно возникает при решении задачи планирования производства, составления расписания и оптимизации с учетом динамических свойств процессов. Наиболее простым путем перехода от функциональной модели к сетевой является представление функции переходом сети Петри и добавление к переходу двух дополнительных позиций, моделирующих механизм и управление (рис. 5). Представление декомпозиции реализуется иерархическими сетями Петри, описанными выше.

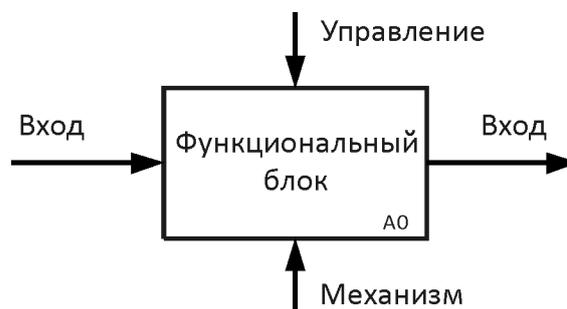


Рис. 4. Функциональный блок диаграммы IDEF0

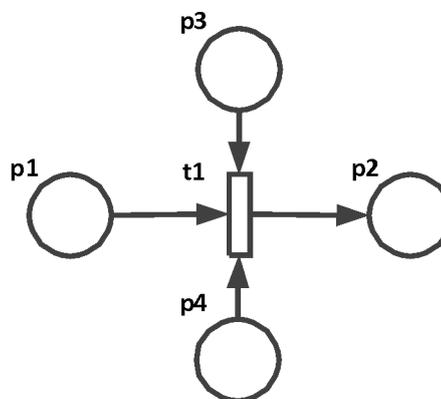


Рис. 5. Сетевая модель функционального блока диаграммы IDEF0

Интерпретация элементов модели:  $t1$  - представляемая функция,  $p1$  - вход,  $p2$  - выход,  $p3$  - управление,  $p4$  - механизм.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ СЕТЯМИ ПЕТРИ

Обобщенные сетине предназначены для отображения временных характеристик процессов. Они упорядочивают события по логическому принципу, а не по времени. Модели производственных систем, как правило, создаются с целью планирования, исследования, оптимизации процессов во времени, а также управления в реальном времени по эталонной модели. Это обстоятельство требует применения таких типов сетей, которые способны отображать временные задержки, например временных сетей Петри, раскрашенных сетей или E-сетей.

Практический опыт различных исследователей [6] и автора статьи позволяет сделать вывод, что приведенные выше задачи наилучшим образом решаются с помощью временных и цветных (раскрашенных) сетей Петри. Цветные сети представляют многономенклатурное производство в виде наиболее рационально организованной и компактной модели. Соответственно, их применение позволяет и решать содержательные задачи, и визуализировать производственный процесс.

#### 5. СТОХАСТИЧНОСТЬ МОДЕЛЕЙ

Большинство производственных процессов в своей реализации отклоняются от запланированного выполнения по причине влияния возмущающих воздействий. В производственных системах возмущения можно свести к единой общепринятой классификации и разделить их на детерминированные, полудетерминированные, стохастические и целенаправленные [7].

1. Детерминированная возмущающая среда, когда закон изменения составляющих вектора  $e(t)$  известен, и можно рассчитать значения возмущений в будущие моменты времени.

2. Полудетерминированная возмущающая среда или возмущения волновой структуры. В этом случае возмущение можно выразить уравнением, связывающим случайно формируемые известные функции некоторого базиса.

3. Стохастическая возмущающая среда, когда изменение вектора  $e(t)$  носит случайный характер, т. е.  $e(t)$  - есть случайный процесс.

4. Целенаправленная возмущающая среда, когда «выбор» возмущения  $e(t)$  осуществляется средой (противником) в соответствии с некоторой целью, не всегда совпадающей с целью управления.

Приведем обобщенный перечень факторов, которые можно классифицировать как возмущающие в производственной системе: неисправность оборудования, неисправность оснастки, сбой в работе устройства ЧПУ, отсутствие рабочего, неисправность транспорта, брак производимой продукции.

Каждое из вышеперечисленных возмущающих воздействий может быть определено подробно для синтеза индивидуального управления элементами производственной структуры. Для группового управления достаточно описания данных воздействий в форме «действует», «не действует».

Количество бракованных изделий при предварительном планировании, как правило, задается в процентном соотношении от общего количества. Очевидными путями восполнения бракованных изделий является производство заведомо большего объема продукции или определение в конце периода управления (смены) количество бракованных изделий с увеличением плана на последующие периоды. Точки приложения возмущающих воздействий в модели производственной системы, как правило, определить нетрудно т.к. переходы соответствуют операциям производственного процесса.

Подобная классификация возмущающих воздействий позволяет разработать принципы моделирования различных их видов. Сети Петри обладают множеством вариантов учета стохастичности объекта, например использование нечетких или стохастических сетей, сетей с переменной кратностью дуг, с переменной структурой и т.д.

Использование принципов методологии SADT (IDEF0) делает удобным применение двух способов представления возмущений.

1. Поскольку с переходами сетевой модели связаны отдельные позиции, моделирующие ресурсы системы (механизмы), то наличие/отсутствие маркеров в этих позициях может представлять отказы оборудования, отсутствие исполнителей, требуемой оснастки, инструмента и т.д. Такой метод представления возмущений рекомендуется для детерминированных или полудетерминированных возмущений.

2. Использование вероятностных законов распределения времени срабатывания переходов и количества маркеров в позициях. Это известный метод, который применяется во многих системах моделирования, например GPSSи Arena.

### 5. СТАНДАРТИЗАЦИЯ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Сети Петри при всех достоинствах, описанных выше, не являются стандартным и общепринятым способом представления моделей производства. Связано это с тем, что такие модели плохо визуализируют процесс. Можно отметить три основные причины, обуславливающие слабые выразительные способности сетевых моделей.

1. Дискретные производства является сложными системами. В моделях сложных систем количество вершин графа, представляющего систему, гораздо меньше количества связей между вершинами. Это обусловлено многовариантностью технологических процессов по своей реализации. В моделях эта сложность приводит к запутанной системе связей, восприятие которой затруднено.

2. Количество элементов модели достаточно большое, для реальных производственных систем уровня производственного цеха или участка количество позиций и переходов измеряется десятками и сотнями. Соответственно, имитационная модель получается довольно громоздкой. Частично эта проблема решается использованием иерархических сетей.

3. Элементы сетевой модели (позиции и переходы) никак не отличаются друг от друга кроме как порядковыми номерами. Для того, чтобы понять их смысловую нагрузку, требуется

обращаться к документации или разработчику модели.

### 6. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТЯМИ ПЕТРИ

К настоящему времени разработаны различные формализмы сетей Петри и программные продукты их использующие. К сожалению, для большинства из существующих программ характерна не слишком развитая функциональность. При этом основные функции с точки зрения моделирования производственных систем (анализ результатов и оптимизация) в большинстве программ вообще не реализованы. Из более современных разработок можно отметить программный продукт RAO-studio, в котором создан специальный язык моделирования на основе сетей Петри и имеются средства визуального представления не только в виде сетей Петри, но и в виде анимации выполняемых операций на плане расположения оборудования. Этот подход можно рассматривать как серьезную попытку ликвидировать недостатки сетевых моделей, описанные в предыдущем параграфе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье представлены и обобщены некоторые вопросы, связанные с имитационным моделированием производственных систем сетями Петри. Основными особенностями моделей дискретного производства можно считать иерархичность, модульность и стохастичность. Опыт показывает, что сети Петри обладают возможностями отображения перечисленных свойств и могут адекватно представлять системы разного уровня сложности. Из недостатков сетей Петри можно отметить сложную структуру и слабую визуализацию

Таблица 1

*Функциональные возможности некоторых программ моделирования*

Программа	Визуальное моделирование	Анализ сети	Анализ результатов	Методы оптимизации
VisObjNet	+	-	-	-
TNet	+	+	+	+
PIPE	+	+	-	-
HPSim	+	+	-	-
CPN Tools	+	+	+	-

процессов, недетерминированность функционирования модели, а также недостаточно развитые средства оптимизации систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лескин, А. А.* Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридонов. – Л.: Наука, 1989. – 133 с.

2. *Воробьев, С. А.* Планирование и управление дискретным производством на основе временных сетей Петри с переменной нагрузкой: дис. канд. техн. наук: 05.13.14 / С. А. Воробьев. – Красноярск, 2002. – 149 с.

3. *Макаров, И. М.* Проблемы создания гибких автоматизированных производств / И. М. Макаров, Д. Е. Оцохимский, Е. П. Попов и др.; - М.: Наука, 1987. – 253 с.

**Сочнев Алексей Николаевич** – кандидат технических наук, докторант Института космических и информационных технологий. ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск E-mail: lesek@mail.ru

4. *Moody, J.* Feedback control of Petri Nets Based on Place Invariants: Technical Report of the ISIS Group at the University of Notre Dame/ K. Yamalidou, J. Moody, M. Lemmon, P. Antsaklis. – ISIS-94-002, 1994.

5. *Репин В.В., Елиферов В.Г.* Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.

6. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: Учеб. пособие для вузов / С. В. Пантюшин, В.М. Назаретов, О. А. Тягунов и др.; Под. ред. И. М. Макарова. – М.: Высш. шк., 1986. – 175 с.: ил.

7. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах: сб. науч. тр. / Под ред. К. Т. Леондеса. - М.: Мир, 1980. – 407 с.

**Sochnev Alexey Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Doctoral candidate of Institute of space and information technologies Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: lesek@mail.ru