

**Степаненко В. Е., Фролов Д.Н. Марьин Б.Н.**

**МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**Степаненко В. Е., Фролов Д. Н. Марьин Б. Н.**

**V.E. Stepanenko, D.N. Frolov, B.N. Maryin**

**МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**SIMULATION METHOD OF PRODUCTION PROCESS ORGANIZATION USING  
EXPANDED PETRI NETS**

**Степаненко Виктор Евгеньевич** – аспирант кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vices@rambler.ru.

**Mr. Victor E. Stepanenko** – PhD Candidate, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: vices@rambler.ru.

**Фролов Дмитрий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

**Mr. Dmitry N. Frolov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

**Марьин Борис Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr. Boris N. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

**Аннотация.** Рассмотрена проблема формирования формального аппарата для анализа организации дискретных металлургического и машиностроительного производств. Проанализированы существующие теории, в рамках которых может быть сформирован метод моделирования для проведения анализа. Обоснован выбор в пользу расширенных сетей Петри. Указаны основные положения разрабатываемого метода.

**Summary.** The paper considers the problem of building a formal framework for the analysis of the organization of discrete metallurgical and machine-building industries. Existing theories are analyzed in the framework of which the method of simulation for such analysis can be developed. The choice of expanded Petri nets is substantiated. Key principles of the method being developed are specified.

**Ключевые слова:** дискретный производственный процесс, моделирование и анализ, расширенные сети Петри.

**Key words:** discrete industry, simulation and analysis, expanded Petri nets.

УДК 519.876

Традиционными типами производства для металлургических и машиностроительных предприятий являются серийное и массовое производства. Эти типы характеризуются ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями, и сравнительно большим объемом выпуска. Такие методы группируют похожие станки и станки, создавая рабочие ячейки или цеха, которые обычно располагаются в разных местах производственного помещения, и работа перемещается из цеха в цех, пока изготовление изделия не будет выполнено в срок. Массовое и серийное производства стали классиче-



ским примером организации производственного процесса. Эти производства позволяют повысить производительность станков и людей при изготовлении больших объемов продукции. В условиях плановой экономики стабильный объем выпуска, а следовательно, и равномерная загрузка мощностей обеспечивались государственным заказом. Этот факт являлся гарантом успешного функционирования предприятия.

В условиях рыночной экономики государственный заказ перестает быть мощным фактором развития организации. Отсутствие стабильного государственного заказа бросило вызов многим предприятиям металлургической и машиностроительной отраслей, заставляя подстраиваться под рыночный спрос на свою продукцию. Столь эффективная, привычная всем форма организации производства начала становиться бременем. Многие предприятия, не сумевшие перестроиться или найти рынки сбыта собственной продукции, перестали существовать, а те, что выжили, были вынуждены резко сократить численность персонала и заморозить собственные мощности.

В этих условиях появляется необходимость в создании гибкой производственной системы, позволяющей в быстрые сроки изготавливать разные виды продукции в том количестве, которое необходимо рынку без создания избыточных производственных затрат. Альтернативой серийному производству в мировой практике производственного менеджмента многие авторы [6; 4; 7] считают бережливое производство «по одному». Данный метод организации производственного процесса позволяет выполнять работу без задержек и остановок. Действия, не добавляющие в продукт стоимость, здесь считаются бесполезными и устраняются путем соединения рабочих этапов друг с другом и уравнивания объемов работы. Благодаря этому продукты поглощаются напрямую последующими рабочими шагами, по одному за один период времени, вплоть до завершения изделия. Такая последовательность производства позволяет получить разные виды конечного продукта ровно за то время, которое действительно необходимо для его выработки. Время ожидания, время простоя в очереди и другие задержки в бережливом производстве рассматриваются как бесполезные и значительно сокращаются или ликвидируются.

Первоочередной задачей производственного менеджера в процессе создания отдельных бережливых линий на предприятии является анализ существующей ситуации – анализ производственного процесса. Являясь объектом сложным, производственные процессы требуют четко формализованной методики проведения процедуры анализа существующих и их преобразования в новые, удовлетворяющие критерию оптимальности (в зависимости от целей преобразования разные – минимизация времени, стоимости и др.). Вопросам создания методики анализа производственных процессов посвящена данная работа.

Опишем основные характеристики процесса производства с точки зрения его организации и функционирования во времени. Дискретным принято считать такой тип производства, в котором исходный материал (сырье) при переработке в конечный продукт претерпевает более одного передела с прерыванием технологического процесса. Металлургическое и машиностроительное производства с их последовательным выполнением нескольких операций, несомненно, являются дискретными. Кроме того, выполнение этих операций происходит продолжительное время, что обуславливает необходимость рассмотрения процесса как динамического объекта. Сложность конечного продукта, его многокомпонентность и иерархическая структура этих компонентов обуславливают иерархическую характеристику процесса производства. Кроме того, данные процессы носят вероятностный (стохастический) характер. Такое заключение можно сделать, проанализировав факторы, влияющие на ход этих процессов (поломка оборудования, задержка ресурсов, колебание спроса на продукцию и др.).

Теперь выделим основные элементы процесса с точки зрения динамики его функционирования. Какова же структура данных элементов? Выдающийся японский менеджер и один из основоположников принципов бережливого производства Сигео Синго [6] выделил следующие основные компоненты производственного процесса:

– *обработка* – физическое изменение материала или его качества;  
– *контроль* – сравнение со стандартом;  
– *транспортировка* – перемещение материалов или изделий, изменение их положения в пространстве;  
– *задержка* – период времени, в течение которого не происходит обработка, контроль или транспортировка.

Кроме того, задержку можно разделить на два типа:

1) *задержка процесса* – вся партия ждет, когда предыдущая партия обрабатывается, контролируется или транспортируется;

2) *задержка партии* – одно изделие обрабатывается, а другие ждут обработки или завершения обработки деталей всей партии. Такой вид задержки возможен также при контроле и транспортировке.

Зачастую указанные компоненты выполняются как последовательно, так и параллельно, например: одновременная параллельная сортовая прокатка стали в несколько нитей в металлургии; одновременная параллельная механическая обработка составных частей крыла самолета перед этапом агрегатной сборки (механообработка происходит параллельно на разных станках), следовательно, процессу производства характерен параллелизм. Таким образом, производственную систему машиностроительного предприятия можно отнести к динамическим дискретным системам со стохастическими последовательно-параллельными многоуровневыми (иерархическими) процессами.

Для формального описания подобных систем наиболее известны методы и модели, которые построены на основе теорий: конечных автоматов [2]; сетей систем массового обслуживания, или стохастических сетей; систем временной логики [1], классических и расширенных сетей Петри [3; 5].

Метод *конечных автоматов* представляет дискретную динамическую систему в виде набора состояний, связанных друг с другом дугами. В соответствии с этим методом в каждый момент времени описываемая система может находиться в одном из состояний. При определенном воздействии на систему она может перейти из текущего состояния по дуге, ведущей в новое состояние. При таком переходе система обычно генерирует некоторый выходной сигнал или реализует некоторую операцию. Основная область использования конечных автоматов – это сосредоточенные дискретно событийные системы. При использовании данного аппарата применительно к производственным системам возникает ряд проблем, одна из них состоит в том, что конечный автомат отражает лишь последовательные события и малопригоден для представления их возможного параллелизма. Наконец, конечные автоматы неудобны для иерархического, т.е. многоуровневого, представления системы, что очень часто бывает необходимо для упрощения их описания. Вследствие этих причин конечные автоматы редко применяются для формализации производственных систем с большой сложностью структуры протекающих в них процессов.

*Стохастические сети* представляют собой совокупности взаимосвязанных простых систем массового обслуживания (СМО) [1]. Эти сети часто применяются для оценки характеристик функционирования транспортных систем, коммуникационных систем и вообще любых систем, которые могут быть представлены в форме графа с узлами, осуществляющими некоторые операции. Динамическими объектами стохастической сети служат запросы на обслуживание, которые проходят через ряд узлов обслуживания, перемещаясь по дугам, связывающим разные узлы, в общем случае запросы порождаются окружающей средой и после завершения обслуживания покидают сеть. Таким образом, окружающая среда как источник запросов должна учитываться при рассмотрении стохастической сети. Существенно, что интервалы обслуживания запросов отдельными узлами сети имеют случайную длительность, а обслуженный запрос передается в другой узел с некоторой вероятностью. Этим и объясняется название «стохастические сети».

Применительно к производственной системе каждый её узел (выполняемая операция или их набор) можно формально представить некоторой системой массового обслуживания. Соединив ориентированными дугами системы массового обслуживания, в соответствии с реальными связями между этими системами, получаем стохастическую сеть, представляющую данную производственную систему. После этого существующими методами можно аналитически вычислить различные характеристики функционирования данной производственной системы: время реакции, пропускную способность, загруженность узлов, обработку запросов и т.п. Однако возможности аппарата стохастических сетей для описания и исследования таких сложных производственных систем ограничены. Это объясняется, прежде всего, тем, что не для всех сетей существуют аналитические решения. Даже если аналитическое решение существует, оно может оказаться слишком сложным вследствие большого числа компонентов, образующих моделируемую систему. Наконец, в терминах стохастических сетей нельзя выразить различные аспекты синхронизации процессов (операций процесса), играющие исключительно важную роль в поведении системы. Вследствие этих причин метод стохастических сетей может играть лишь вспомогательную роль в исследовании производственных систем (например, при изучении таких их отдельных компонентов, как динамика склада или производственного участка.)

Обратимся теперь к *методу временной логики*. Этот метод ориентирован на описание и анализ параллельных процессов в терминах событий, находящихся в определенных отношениях друг с другом во времени [1]. В методе временной логики используется ограниченный набор операторов, из которых важнейшими являются операторы «всегда», «иногда» и «следующий». Путем комбинации этих операторов на множестве предикатов можно выражать различные временные отношения между событиями и процессами. Временная логика построена по классической схеме математической системы. В ней определено множество примитивных символов (символы предикатов, операторы классической логики, операторы временной логики), специфицированы правила вывода правильно построенных формул (эти правила включают в себя аксиомы исчисления высказываний и временные аксиомы), а также дан набор теорем, который при необходимости может быть расширен применением аксиом, правил вывода и доказанных теорем. Смысл временной логики основан на понятии состояния и последовательности выполнения процесса. С помощью этих понятий удастся проводить формальное доказательство таких важных свойств параллельных процессов, как безопасность и живость. К сожалению, во временной логике в явном виде отсутствует понятие параллелизма процессов. На языке временной логики поведение любой системы разбивается на отдельные события, между которыми задаются различные временные отношения. Однако в реальной системе не для каждой пары событий существует отношение временной упорядоченности. Этот недостаток ограничивает применение временной логики в основном исследовании систем, имеющих общее адресное пространство. Существенным недостатком временной логики является сложность и громоздкость формальных доказательств. Поэтому можно утверждать, что метод временной логики едва ли пригоден для описания и анализа производственных систем.

Применительно к таким сложным динамическим системам, которыми являются производственные системы, выбираемый аппарат должен не только допускать достаточно простой формальный анализ с необходимой графической поддержкой, но и позволять проведение имитационного моделирования, в чем почти всегда возникает необходимость при изучении сложных систем. Таким аппаратом служат сети Петри (для формального анализа) и их расширения (для имитационного моделирования). Именно этот аппарат лег в основу предлагаемого нами метода, позволяющего анализировать разнообразные производственные процессы.

Построение моделей систем в виде сетей Петри заключается в следующем:

1) Моделируемые процессы описываются множеством событий (действий) и условий определяющих возможность наступления этих событий, а также причинно-следственными отношениями, устанавливаемыми на множестве пар «события-условия».

2) Определяются события-действия, последовательность выполнения которых управляется состояниями системы. Состояния системы задаются множеством условий, формируемых в виде предикатов. Количественно условия характеризуются величиной, которая выражается числами натурального ряда.

3) Условия, в зависимости от значений их количественных характеристик, могут выполняться или нет. Выполнение условий обеспечивает возможность реализации событий. Условия, с фактом выполнения которых связывается возможность реализации событий, называются предусловиями. Реализация события обеспечивает возможность выполнения других условий, находящихся с предусловиями в причинно-следственной связи. Эти условия называются постусловиями. В сетях Петри условия – это позиции, а события – переходы. Изображение позиции и перехода на графе показано на рис. 1.



Рис. 1. Изображение позиции (а) и перехода (б)

Как уже говорилось ранее, производственный процесс можно разделить на следующие компоненты: *обработка, контроль, транспортировка, задержка*. Рассмотрим каждый из них.

Для моделирования *транспортировки* в общем случае может быть применена сеть, изображенная на рис. 2, а. В случае, если необходимо смоделировать транспортировку с помощью транспортных средств с ограниченной емкостью (грузоподъемностью), может быть применена сеть, изображенная на рис. 2, г. Величина  $n$  моделирует емкость.

*Обработка* имеет несколько вариаций:

– обработка, направленная на изменение физических характеристик ресурса (компонента изделия), например, прокатка и механообработка – изменение геометрии ресурса, превращение заготовки в деталь. Здесь количество ресурсов входных ресурсов равно количеству выходных ресурсов. Данный тип обработки может быть смоделирован при помощи сети, изображенной на рис. 2, а. Кроме того, на рис. 2, г представлен вариант моделирования обработки при помощи производства (оборудования) с ограниченным количеством одновременно обрабатываемых ресурсов  $n$ ;

– *разделение ресурса*. Например, операция раскрыя металлического изделия. Здесь из одного входного ресурса может быть получено более одного выходного ресурса (заготовки, детали). Данный тип представлен на рис. 2, в;

– *сборка* (объединение ресурса). Позволяет смоделировать процесс агрегатной сборки в машиностроительном производстве (рис. 2, б).

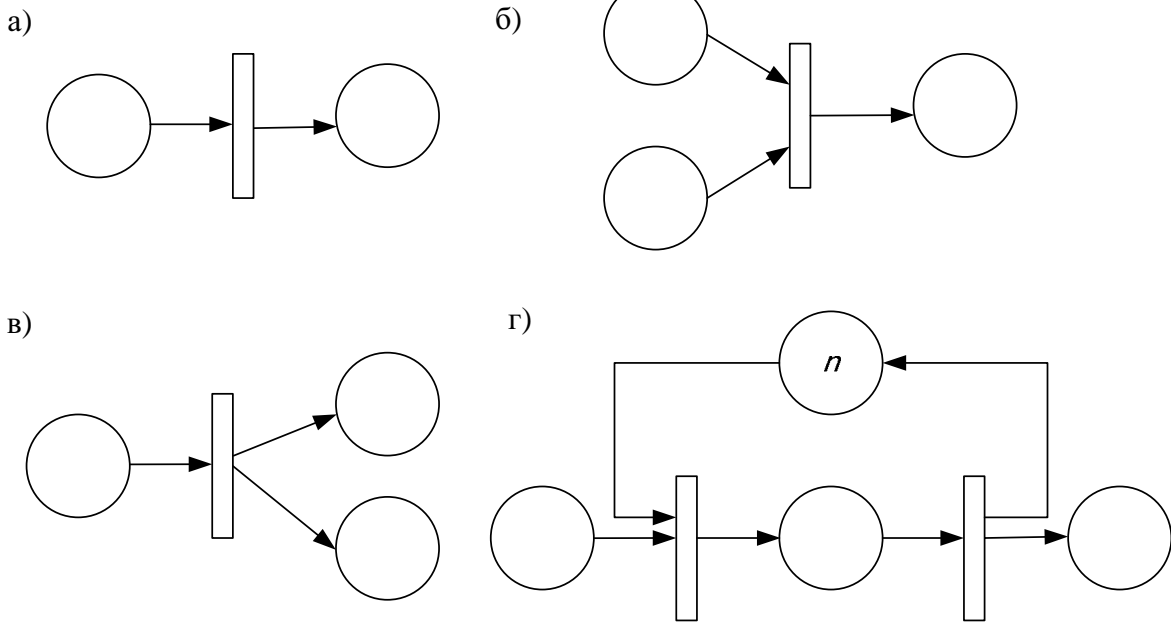


Рис. 2. Элементарные сети Петри для моделирования основных компонентов производственного процесса

Контроль может быть с отправкой брака на специальный склад (буфер) (см. рис. 3, а), либо с отправкой на доработку на предыдущую операцию (см. рис. 3, б).

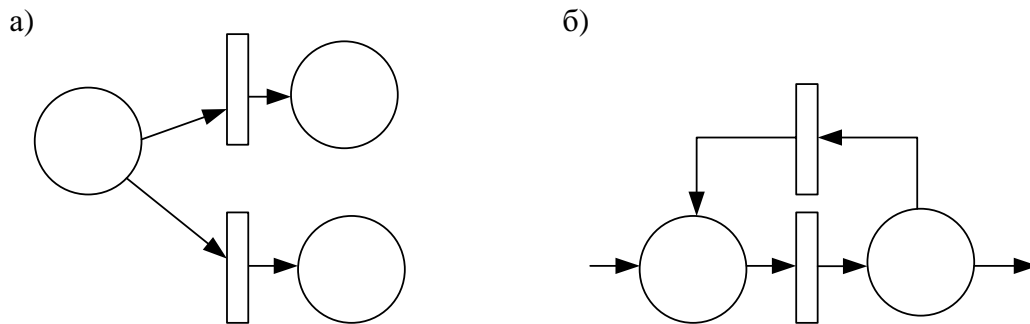


Рис. 3. Элементарные сети для моделирования контроля

Представленные на рис. 2 и 3 элементы сети представляют собой класс классических сетей Петри. Дадим формальное определение. Сеть Петри определяется пятеркой

$$N = \{P, T, J, O, M_0\},$$

где  $P = \{p_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – множество позиций;  $T = \{t_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  – множество переходов;  $J : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$  – функция следования;  $O : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  – функция предшествования;  $M_0 : P \rightarrow Z_0$  – начальное маркирование (состояние) сети. Здесь  $Z_0$  – множество положительных целых чисел [4].

Задача моделирования задержки порождает необходимость в использовании временных сетей.

Временная сеть представляется двойкой

$$N_T = \{N, \tau\},$$

где  $N$  – сеть Петри;  $\tau : T \rightarrow R_0$  – функция времён срабатывания, сопоставляющая каждому переходу постоянное время срабатывания;  $R_0$  – множество неотрицательных рациональных чисел.

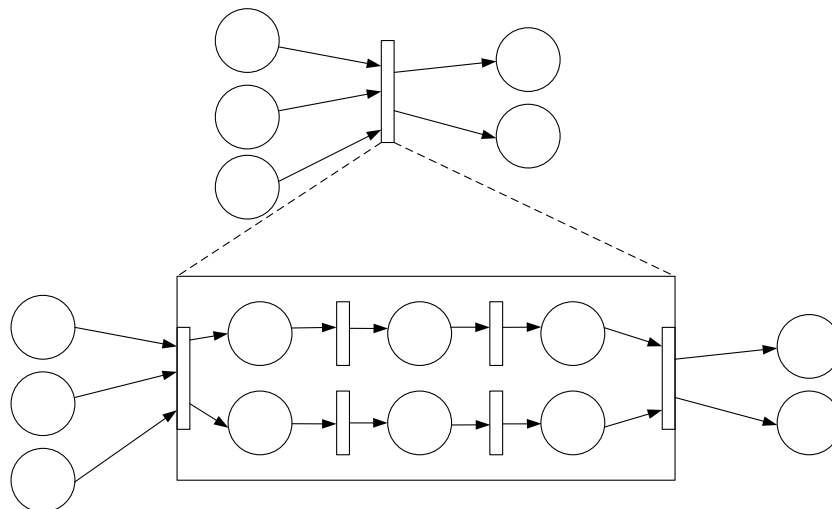


Рис. 4. Декомпозиция перехода сети Петри

Такая сеть позволяет более реалистично отражать производственные процессы. Во временных сетях каждому переходу  $t_j$  сопоставляется время  $\tau_j$ . Если переход возбуждается, то метки, вызвавшие запуск перехода, покидают входные позиции. Порождение меток в выходных позициях происходит через время  $\tau_j$ . Величина  $\tau_j$  является величиной задержки.

Таким образом, определяется способ формализации основных компонентов производственного процесса с точки зрения его организации и движения материального потока.

Однако при построении модели производственного процесса с помощью временной сети Петри возникает необходимость в обеспечении приоритета срабатывания альтернативных переходов как, например, в сети моделирующей контроль (см. рис. 3). Данная задача обуславливает необходимость в использовании механизмов сетей с приоритетами переходов. Временная приоритетная сеть представляется как

$$N_{\text{PRT}} = \{N_T, \text{Pr}\},$$

где  $\text{Pr}$  – отношение приоритетности (порядка), задаваемое на множестве переходов  $T$  и определяющее порядок потребления меток возбуждёнными переходами в условиях конфликта за метку.

В случае с сетями, изображенными на рис. 3, приоритет срабатывания каждого из переходов может быть определен статистически, например, как частота  $P$  появления события, вычисленного по формуле

$$P(A) = m/n,$$



где  $A$  – появления брака при осуществлении обработки или поставки бракованных материалов от поставщика;  $m$  – количество появлений брака;  $n$  – количество всех обработанных или поставленных ресурсов.

Выше уже упоминалось о такой особенности производственных процессов, как иерархическая структура. Иерархию производственного процесса можно формализовать и представить с помощью вложенных сетей (см. рис. 4).

Вложенные сети позволяют значительно упростить процесс построения моделей сложных процессов за счет замены отдельных подсетей на переход. Примером использования данного механизма могут служить представленные на рис. 2, *a* и 2, *г* элементарные сети. Путем замены основного механизма обеспечения емкости средств производства на обычный переход из сети 2, *г* получаем сеть 2, *a*.

При принятии решения об организации производства (производственной линии) лицу, принимающему решение, несомненно, необходимо основываться на фактах. Являясь объектом сложным, производственные процессы требуют четко формализованного метода их анализа. Математический аппарат временных приоритетных и иерархических сетей Петри, имея некоторые преимущества среди прочих средств моделирования производственных процессов, позволяет создать такое средство.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гуц, А. К. Математическая логика и теория алгоритмов: учеб. пособие / А. К. Гуц. – Омск: Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. – 108 с.
- 2 Хопкрофт, Джон. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений = Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation / Джон Хопкрофт, Раджив Мотвани, Джеффри Ульман. – М.: Вильямс, 2002. – 528 с.
- 3 Ехлаков, Ю. П. Сети Петри в моделировании бизнес-процессов. Теоретические основы и приложения: монография / Ю. П. Ехлаков, О. И. Жуковский, П. В. Сенченко, В. Ф. Тарасенко; под. ред. проф. Ю.П. Ехлакова. – Томск: ТУСУР, 2007. – 205 с.
- 4 Оно, Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно; пер. с англ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 208 с.
- 5 Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Джеймс Питерсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
- 6 Синго, С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / Сигео Синго; пер. с англ. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2006. – 312 с.
- 7 Хоббс, Д. П. Внедрение бережливого производства: практическое руководство по оптимизации бизнеса / Денис П. Хоббс; пер. с англ. П. В. Гомолко (гл. 1-3), А. Г. Петкевич; науч. ред. Д. В. Середа. – Минск: Гревцов Паблицер, 2007. – 352 с.