

УДК 517.977.1

DOI: 10.17223/19988605/57/2

А.Н. Сочнев

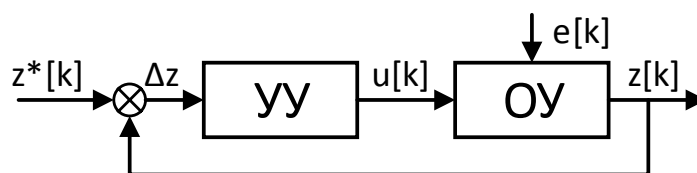
## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ ПО ОТКЛОНЕНИЮ В МОДЕЛЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Основной идеей работы является использование базовых принципов теории автоматического управления в моделях на основе сетей Петри, в частности реализация обратной связи по состоянию в структуре имитационной модели. Разработан алгоритм совместного функционирования модели объекта управления и устройства управления для класса временных сетей Петри. Апробирован вариант формирования устройства управления на основе логических функций с экспертно сформулированными правилами.

**Ключевые слова:** сеть Петри; управление по отклонению; сетевой контроллер; логическая функция; переходный процесс.

Принято различать три фундаментальных принципа управления: принцип разомкнутого управления (программное управление), принцип компенсации (управление по возмущению), принцип обратной связи (управление по отклонению). Поиск функции, описывающей закон управления, для перечисленных видов осуществляется при решении задачи синтеза управления по заданному критерию качества [1, 2]. Выбор того или иного принципа управления должен основываться на анализе типа объекта и возможных возмущающих воздействий.

Сущность принципа разомкнутого управления состоит в том, что программа управления жестко определена задающим устройством; управление не учитывает влияние возмущений на параметры процесса. Если возмущающий фактор искажает выходную величину до недопустимых пределов, то применяют принцип компенсации, основное достоинство которого состоит в скорости реакции на возмущения. Он более точен, чем принцип разомкнутого управления. Наибольшее распространение в теории управления получил принцип обратной связи (рис. 1). Здесь управляющее воздействие корректируется в зависимости от выходной величины  $z(k)$ . Если значение  $z(k)$  отклоняется от требуемого, то происходит корректировка сигнала с целью уменьшения данного отклонения.



УУ – управляющее устройство, ОУ – объект управления

Рис. 1. Структура системы управления по отклонению

Fig. 1. Deviation control system structure

В опубликованных ранее работах некоторых исследователей формулируются методы, использующие описанный подход при структурировании не только систем управления, но и их модельных эквивалентов [3–6]. Далее для определенности под моделями систем будут пониматься имитационные модели на основе формализмов сетей Петри. Например, в работах [3, 4] определены механизмы доведения управляющих воздействий до сети Петри с использованием переходов. В работах [4, 5] решались некоторые задачи воздействия на сеть с применением модели управляющего устройства,

названного сетевым контроллером. Анализ этих работ выявил некоторую ограниченность предложенных в них подходов. В частности, ставилась и решалась задача обеспечения ограниченности маркировки сети Петри с использованием сетевого контроллера [3, 6]. Также рассматривалась и частично решалась задача обеспечения инвариантности систем к возмущениям. Обобщение и развитие этих подходов привело к идее применения механизма обратной связи внутри имитационной модели на основе сети Петри для решения более широкого круга задач.

Таким образом, основная научная задача, поставленная в начале исследования, состоит в реализации принципа управления по отклонению в структуре имитационных моделей на основе сетей Петри, а основная практическая задача – в апробации такого подхода и доказательстве его состоятельности на основе тестовой практической задачи.

## 1. Управление по отклонению в сетевых моделях

Основы теории сетей Петри были заложены в 60-х гг. XX в. немецким ученым Карлом Петри. С тех пор теория сильно разрослась и до сих пор продолжает активно развиваться. За время исследований сетей Петри было накоплено большое количество теоретических результатов и практического опыта в области спецификации и анализа параллельных и распределенных систем [7, 8].

Сети Петри позволяют с достаточной степенью детализации моделировать процессы управления в параллельных системах и протоколы взаимодействия. В них имеются простые конструкции для описания структур параллелизма: последовательная композиция, выбор, параллельное слияние. Различные модификации сети Петри позволяют вводить такие характеристики динамических процессов, как временная и пространственная упорядоченность, иерархичность.

Сеть Петри формально описывается набором вида:

$$PN = \{P, T, B, x_0\},$$

где  $P = \{p_i\}$  – непустое конечное множество позиций;  $T = \{t_j\}$  – непустое конечное множество переходов;  $B = B^+ - B^-$  – отношение инцидентности позиций и переходов;  $x_0 : P \rightarrow R^+$  – начальная маркировка сети;  $R^+$  – множество целых неотрицательных чисел.

Здесь и далее применены обозначения маркировки и матрицы инцидентности сети Петри, отличающиеся от типичных, представленных в литературе. Поскольку идеей статьи является использование основных положений теории автоматического управления к сетевому моделированию, то используются общепринятые для теории управления обозначения вектора состояния (маркировки), вектора управления и матриц инцидентности [1].

Матрица инцидентности позволяет определить уравнение, формирующее механизм изменения маркировки сети:

$$x[k+1] = x[k] - B^- u[k] + B^+ u[k], \quad (1)$$

где  $u[k]$  – вектор-столбец длины  $|T|$ , имеющий единственный ненулевой элемент в позиции  $j$ , равный 1 и, соответственно, определяющий какой из переходов срабатывает на текущем такте управления.

Для решения задачи управления производством модель должна отображать временные соотношения представляемого процесса, поэтому на практике используются временные сети Петри. Формальное определение временной сети:

$$TN = \{PN, \tau\},$$

где  $PN$  – сеть Петри;  $\tau : T \rightarrow R^+$  – функция времени срабатывания, сопоставляющая каждому переходу некоторое постоянное время срабатывания.

Структура модели, соответствующая уравнению (1) представлена на рис. 2.

Условие срабатывания переходов сети имеет вид:

$$B^- u[k] \leq x[k]. \quad (2)$$

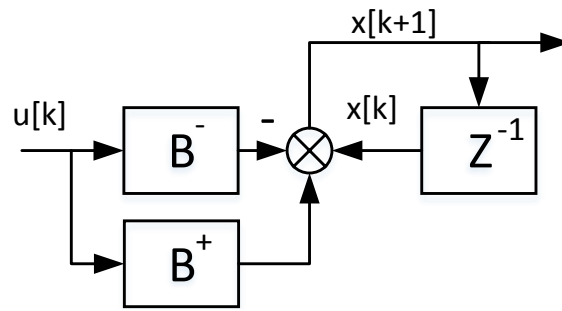


Рис. 2. Структура модельного объекта управления  
Fig. 2. The structure of the control object model

Реализация системы управления по отклонению предполагает определение объекта управления (ОУ). В случае с модельным представлением данный термин обозначает не сам объект, а его модель. Для реализации системы управления в структуру должны быть добавлены устройство управления (регулятор) (УУ (P)) и задающее устройство (ЗУ) (рис. 3). В случае использования сетей Петри для моделирования устройство управления функционирует на основе выражения (2).

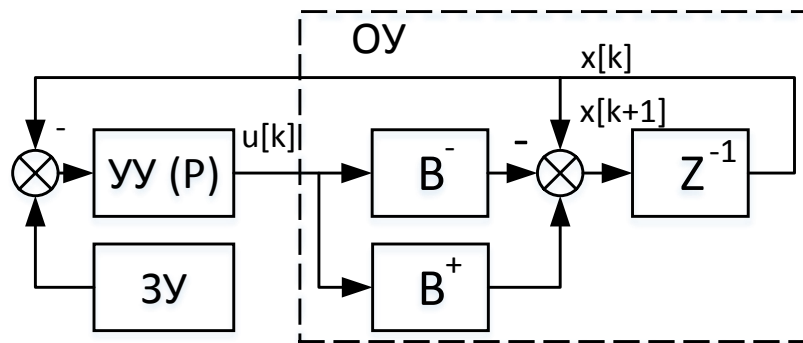


Рис. 3. Структура системы управления по отклонению в сетевых моделях  
Fig. 3. Deviation control system structure in network models

В представленной структуре не учитывается влияние возмущающих воздействий. В общем случае требуется дополнительно создать модель реализации возмущающих воздействий (рис. 4). На рисунке представлен один из возможных вариантов введения модели возмущения через дополнительную матрицу инцидентности возмущений и переходов  $E$ . Возможны и другие варианты создания моделей возмущений [3].

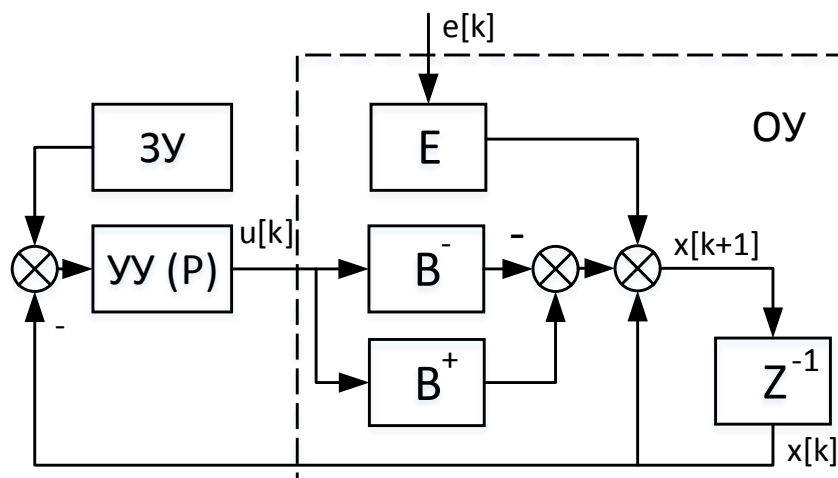


Рис. 4. Структура системы управления по отклонению в сетевых моделях (с возмущениями)  
Fig. 4. Deviation control system structure in network models (with perturbations)

Основными задачами реализации в сетевых моделях модели системы управления являются организация обратной связи по состоянию и формирование модельного описания устройства управления (УУ). Под состоянием сетевой модели понимаются количественные характеристики, определяющие текущее состояние объекта. В самом общем случае это может быть вектор срабатывания переходов, статистика их занятости или текущая маркировка сети Петри [9]. В представленной выше структуре и в примере далее в качестве вектора состояния используется маркировка позиций.

Устройство управления (УУ) должно содержать в структуре некоторую математическую базу, которая на основе отклонения выхода формирует текущее значение управляющего вектора. Указанная задача может быть реализована различными способами, например с использованием логических функций, искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, экспертных систем и т.д. Выбор того или иного средства должен определяться сложностью решаемых задач управления и особенностями моделируемого и исследуемого объекта. В данной работе будет показано применение в качестве математической основы УУ набора логических функций. Такой выбор обусловлен их очевидной простотой и соответствием реализуемому в системе закону управления.

С точки зрения формализованного описания сети Петри с внедрением в модель УУ требуется изменить правила срабатывания переходов сети, добавив в них условия, формируемые на выходе УУ. Алгоритм функционирования модели устройства управления в сети Петри можно определить следующей последовательностью действий.

1. Определение активных переходов сети Петри. Проверка условия срабатывания на основе выражения (2).

2. Формирование выходного вектора УУ как некоторой функции от вектора состояния и вектора задающего воздействия

$$u[k] = f(x[k], g[k]).$$

3. Удаление маркеров из входных позиций активных переходов

$$x[k+1] = x[k] - B^- u[k].$$

4. Добавление в выходные позиции переходов маркеров в соответствии с временными задержками

$$x[k+1] = x[k] - B^+ u[k].$$

5. Пересчет модельного времени

$$\tau = \tau + \Delta\tau.$$

6. Если  $\tau < \tau_{\max}$ , то переход к пункту 1, в противном случае – прекращение имитационного эксперимента.

## 2. Имитационное моделирование производственного процесса

На машиностроительном заводе производственный процесс включает: подготовку материалов и заготовок для последующей обработки, хранение; различные виды обработки (механическая, термическая и т.д.); сборку изделий и их транспортирование, контроль качества обработки или сборки на всех этапах производства; транспортирование заготовок и изделий по цехам и участкам или всему заводу; отделку, окраску и упаковку; хранение готовой продукции.

Технологическим процессом называют часть производственного процесса, содержащую действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Технологический процесс состоит из технологических и вспомогательных операций. Производственная программа машиностроительного завода содержит номенклатуру изделий, изготавливаемых с указанием их типов и размеров, количество изделий каждого наименования, подлежащих изготовлению в течение года, перечень и количество запасных частей к выпускаемым изделиям [10].

Общим для большинства производственных процессов машиностроения является наличие в структуре процесса сборочной операции. Для сборки необходимо обеспечивать требуемые запасы всех комплектующих на входе операции. Специфика этой операции состоит в том, что она требует согла-

сованной и синхронизированной работы предшествующих участков: заготовительного, механообработки и других, и поэтому является наиболее предпочтительной для использования обратных связей.

**Описание производственной системы.** Исследуется участок машиностроительного предприятия. Производятся детали четырех типов. Имеются следующие операции производственного процесса: токарная обработка, фрезерная обработка, сборка и контроль качества. Определены параметры технологических операций: длительности выполнения операций, объемы партий и потребность в деталях каждого типа для сборочной операции. На предпоследней стадии производственного процесса производится сборка готовых деталей в одну сборочную единицу. В конструкции определено количество каждого типа деталей, требуемых для сварки. Детализированная структура технологических процессов для изделий представлена на рис. 5.

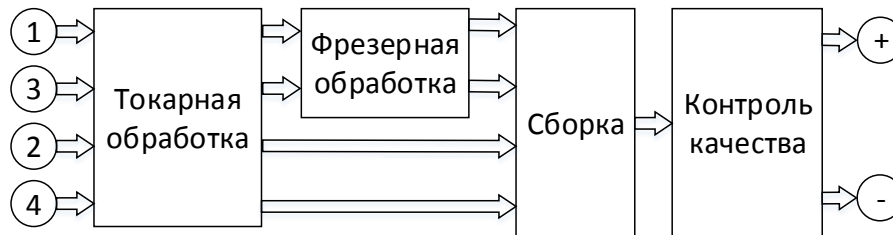


Рис. 5. Структура производственного процесса

Fig. 5. Production process structure

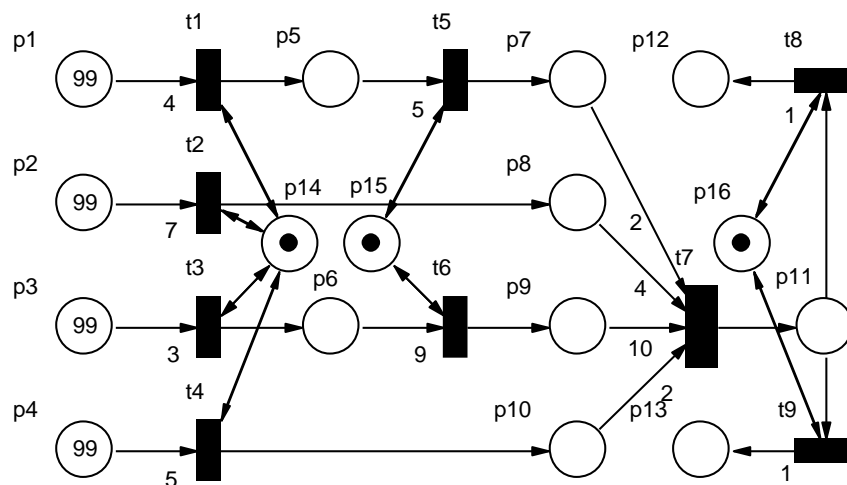


Рис. 6. Сетевая модель производственного процесса

Fig. 6. Net model of a production process

Таблица 1

Функциональное назначение элементов модели

Позиции	
$p1...p4$	Заготовки изделий типа 1, 2, 3, 4
$p5, p6$	Детали 1, 3 после токарной обработки
$p7...p10$	Детали 1, 2, 3, 4 после фрезерной обработки
$p11$	Готовая сборка
$p12$	Сборка после контроля качества
$p13$	Сборка после контроля качества (брак)
$p14, p15, p16$	Занятость токарного, фрезерного станка и участка контроля
Переходы	
$t1...t4$	Токарная обработка деталей 1, 2, 3, 4
$t5...t6$	Фрезерная обработка деталей 1, 3
$t7$	Операция сборки деталей 1, 2, 3, 4
$t8$	Контроль качества
$t9$	Контроль качества (с отбраковкой)

Для представления имитационной модели используются временные сети Петри (рис. 6). На первой стадии исследования модель описывает структуру процессов производственной системы и не использует обратную связь. Описание элементов модели приведено в табл. 1.

**Имитационный эксперимент с сетевой моделью.** Выполняется имитационное моделирование сети на выбранном интервале времени и оценивается результат с точки зрения выбранного критерия качества. Постоянная времени (период) для моделирования выбрана  $\tau = 1$  мин.

В сети Петри, представленной выше, используется равновероятный механизм разрешения проблемы конфликта за ресурсы, которыми в данном случае являются три типа технологического оборудования: токарный станок, фрезерный станок и участок контроля качества. В случае случайного выбора перехода для выполнения можно прогнозировать случайные характеристики качества процессов. Если установить определенные правила срабатывания, например в порядке нумерации переходов, то можно получить некоторые детерминированные величины показателей качества процесса. Примем для определенности, что признаком завершения переходного процесса в представленной модели будем считать появление первого маркера в одной из выходных позиций  $p_{12}$  или  $p_{13}$ . По итогу эксперимента определено время переходного процесса  $T_{\Pi} = 1\,393$  мин.

Определим условно два режима функционирования производственной системы: установившийся и переходный. Переходный режим предполагает переход от одного режима работы к другому, чаще всего из режима остановки к установившемуся режиму. Установившийся режим характеризуется постоянством всех количественных показателей функционирования. В теории управления принято качество переходного процесса характеризовать двумя основными характеристиками: временем переходного процесса и величиной перерегулирования. В приведенном ниже примере формулируется задача минимизации времени переходного процесса производственного участка машиностроительного производства. Приводится решение данной задачи на основе имитационного моделирования процесса сетью Петри с обратными связями по состоянию.

### 3. Реализация системы управления по отклонению

Ранее в качестве формальной основы устройства управления были выбраны логические функции. Для их реализации такой системы требуется синтез системы логических правил, по которым будет определяться управляющее воздействие на модель объекта управления [11, 12]. Экспертный анализ структуры процесса в исследуемой системе и характеристик операций позволяет сделать вывод, что для достижения поставленной цели нужно создать систему логических правил, обеспечивающих наличие заданного технологическими соотношениями количества деталей для выполнения сборки как можно быстрее и далее на каждом интервале управления. В терминологии сетей Петри это требование трансформируется в обеспечение требуемой маркировки позиций  $p_7, p_8, p_9, p_{10}$ . Очевидно, маркировка этих позиций должна использоваться создаваемыми логическими правилами.

Второе соображение, используемое при создании модели устройства управления, состоит в учете времени выполнения операций и относительного количества требуемых для сборки деталей каждого типа. В рассматриваемом примере целесообразно максимально повысить приоритет третьей детали, поскольку общий фонд времени для ее производства максимальный. Для более сложных процессов экспертные оценки приоритетов можно получить после экспериментов с моделью объекта управления, выявив существенные взаимозависимости элементов модели.

После выполненного анализа для рассматриваемой системы сформулировано несколько правил (табл. 2). Они определяют правила совместного функционирования переходов  $t_1, t_2, t_3, t_4$ .

В обозначениях:  $x(7), x(8), x(9), x(10)$  – маркировка позиций  $p_7, p_8, p_9, p_{10}$  соответственно;  $u(1), u(2), u(3), u(4)$  – элементы вектора управления переходами  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . Дополнительно может быть введен коэффициент запаса, который позволяет накапливать большее количество деталей, чем нужно для сборки. Это позволит иметь запас, например при возникновении возмущающих воздействий. Эффект от внедрения описанной структуры устройства управления определен по результату имитационного эксперимента. По его завершении время переходного процесса сократилось до  $T_{\Pi} = 143$  мин.

Таблица 2

Формальное описание устройства управления

Математическое описание	Программное описание
$u(t1) = \overline{(x(p7) \geq 2) + (x(p9) < 10)}$	If $x(7) \geq 2$ Or $x(9) < 10$ Then $u(1) = \text{False}$
$u(t2) = \overline{(x(p8) \geq 4) + (x(p9) < 10)}$	If $x(8) \geq 4$ Or $x(9) < 10$ Then $u(2) = \text{False}$
$u(t3) = \overline{(x(p9) < 10)}$	If $x(9) \geq 10$ Then $u(3) = \text{False}$
$u(t4) = \overline{(x(p10) \geq 1) + (x(p9) < 10)}$	If $x(10) \geq 1$ Or $x(9) < 10$ Then $u(4) = \text{False}$

Дополнительный анализ процесса позволил сделать вывод о том, что возможно уменьшить требуемые запасы маркеров в позициях с целью выравнивания времени выполнения процессов производства всех деталей сборки. Изменение параметров устройства управления выполняется модификацией параметров правил логических функций, представленных выше (табл. 3).

Таблица 3

Формальное описание устройства управления (измененное)

Математическое описание	Программное описание
$u(t1) = \overline{(x(p7) \geq 1) + (x(p9) < 10)}$	If $x(7) \geq 1$ Or $x(9) < 10$ Then $u(1) = \text{False}$
$u(t2) = \overline{(x(p8) \geq 2) + (x(p9) < 10)}$	If $x(8) \geq 2$ Or $x(9) < 10$ Then $u(2) = \text{False}$
$u(t3) = \overline{(x(p9) < 10)}$	If $x(9) \geq 5$ Then $u(3) = \text{False}$
$u(t4) = \overline{(x(p10) \geq 1) + (x(p9) < 10)}$	If $x(10) \geq 1$ Or $x(9) < 10$ Then $u(4) = \text{False}$

Результат моделирования показал сокращение переходного процесса до величины  $T_{\Pi} = 127$  мин (рис. 7).

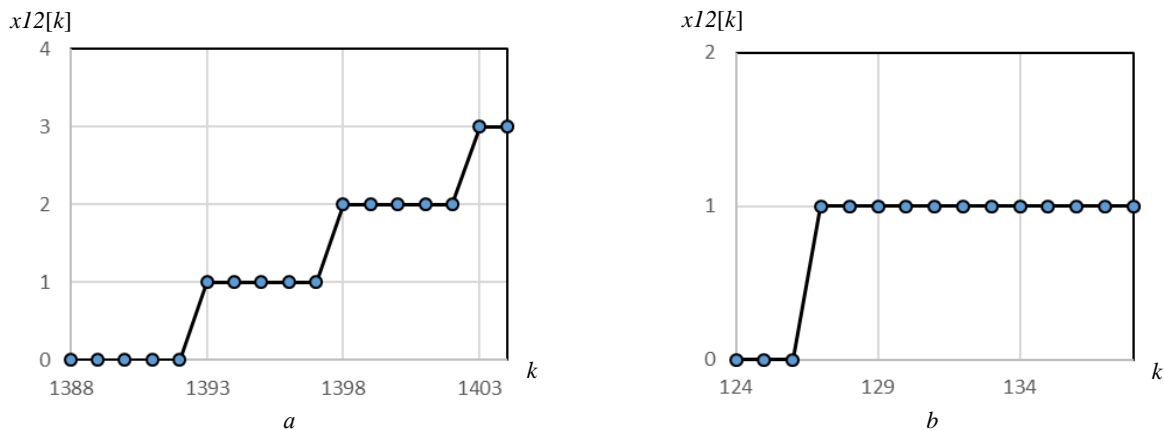


Рис. 7. Графики выпуска продукции при равновероятном выборе переходов (a) и при использовании логических правил (b)  
Fig. 7. Schedules of production with an equally probable choice of transitions (a) and when using logical rules (b)

Для более сложных процессов можно отдельно рассмотреть вопрос применения более функционально развитых математических методов реализации устройства управления. Например, зависимость  $u = f(x)$  можно описать искусственной нейронной сетью или даже отдельной структурой на основе сети Петри. Возможно применение для этой задачи эволюционного алгоритма, например генетического. Однако принципиальная задача данной работы состоит в другом – в описании формального подхода к решению задач управления на основе реализации управления по отклонению внутри имитационной модели. Изложены теоретические положения подхода, рассмотренный пример подтверждает их применимость к решению практических задач. Получен эффект от применения, улучшено значение выбранного критерия оптимальности.

Отметим, что для реализации предложенного подхода синтеза системы управления необходимо выполнить смысловое выделение в имитационной модели входа и выхода. Это требует дополнительного структурирования модели и накладывает некоторые ограничения на конфигурацию сети.

## Заключение

Основные научные, научно-практические и прикладные результаты работы по теме статьи можно сформулировать следующим образом:

1. Обоснована целесообразность модификации механизма выбора переходов при имитации сети Петри для решения некоторых задач управления.
  2. Развита методика к структурированию сетевой модели на объект управления и устройство управления.
  3. Разработан алгоритм функционирования модели с устройством управления.
  4. Определен механизм реализации обратных связей внутри сетевой модели.
- Предложенный подход с положительным результатом апробирован при решении практической задачи планирования производственного процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб. : Профессия, 2003. 752 с.
2. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1989. 301 с.
3. Moody J., Yamalidou K., Lemmon M., Antsaklis P. Feedback control of Petri Nets Based on Place Invariants : Technical Report of the ISIS Group at the University of Notre Dame. ISIS-94-002. 1994.
4. Iordache M.V., Moody J.O., Antsaklis P.J. Automated Synthesis of Deadlock Prevention Supervisors Using Petri Nets : Technical Report at the University of Notre Dame. ISIS-2000-003. 2000.
5. Basile F., Chiacchio P., Giua A. Optimal Petri Net Monitor Design // Synthesis and Control of Discrete Event Systems. Kluwer, 2001. P. 141–154.
6. Сочнев А.Н. Сетевые модели в системах управления производством. Красноярск : Сиб. фед. ун-т, 2014. 162 с.
7. Котов В.Е. Сети Петри. М. : Наука, 1984. 160 с.
8. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М. : Мир, 1984. 264 с.
9. Сочнев А.Н., Рубан А.И. Модификация векторно-матричных моделей на основе сетей Петри // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 98–103.
10. Баранчикова С.Г. Управление машиностроительным предприятием. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 252 с.
11. Мустафаева Д.Г., Мустафаев М.Г. Экспертные системы в организации и управлении производственных процессов // Организатор производства. 2013. № 3 (58). С. 20–23.
12. Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов : учебник для вузов. 3-е изд. СПб. : Питер, 2009. 384 с.

Поступила в редакцию 31 марта 2021 г.

Sochnev A.N. (2021) IMPLEMENTATION OF THE DEVIATION CONTROL PRINCIPLE IN MODELS OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTION BASED ON PETRI NETS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 57. pp. 13–21

DOI: 10.17223/19988605/57/2

The presented article describes an approach to solving control problems for discrete-type production systems based on preliminary simulation modeling with Petri nets. The main idea of the work is to use the basic principles of the theory of automatic control in models based on Petri nets, in particular, the implementation of state feedback in the simulation model.

The expediency and prospects of using the feedback mechanism for solving the problem of control of simulation experiments are substantiated. The problem of optimization of assembly production in the terminology of the theory of automatic control is formulated. The mechanism for creating feedback in the structure of the network model is determined. An algorithm for the joint functioning of the control object model and the control device for the class of temporary Petri nets has been developed.

Based on the developed theoretical provisions, a test example is presented that characterizes the positive effect of their application. A variant of forming a control device based on logical functions with expertly formulated rules has been tested. The presence of assembly production at most machine-building enterprises determines the high practical significance of the developed approach.

The developed approach to process optimization develops the theory of Petri nets, makes it more suitable for modeling complex systems with a branched structure and a large number of interconnections between system elements. The most universal approaches of control theory are used, which allows us to speak about the required degree of invariance to the features of specific systems and the maximum replicability of the approach.



The main disadvantage of the proposed approach is that it is impossible or at least difficult to propose a method for synthesizing a control device according to formal requirements, as is customary in the theory of automatic control. This is due to the need to interpret the elements of the simulation model, to analyze the mechanisms of mutual influence of the elements of the Petri net.

The direction of further research on the topic of the article can be to determine the effectiveness of the proposed approach for various classes of systems. Using the approach for more complex systems and processes will obviously require more advanced mathematical tools to implement control laws, for example, artificial neural networks, which have proven themselves well in the face of difficulties in formalizing the mathematical dependencies of factors.

Keywords: Petri net; deflection control; network controller; logic function; transient.

SOCHNEV Aleksey Nikolaevich (Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Robotics and Technical Cybernetics of the Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation).

E-mail: asochnev@sfu-kras.ru

#### REFERENCES

1. Besekerskiy, V.A. & Popov, E.P. (2003) *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems]. St. Petersburg: Professiya.
2. Popov, E.P. (1989) *Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory of linear systems of automatic regulation and control]. 2nd edition. Moscow: Nauka.
3. Yamalidou, K., Moody, J., Lemmon, M. & Antsaklis, P. (1994) *Feedback control of Petri Nets Based on Place Invariants*. Technical Report of the ISIS Group at the University of Notre Dame.
4. Iordache, M.V., Moody, J.O. & Antsaklis, P.J. (2000) *Automated Synthesis of Deadlock Prevention Supervisors Using Petri Nets*. Technical Report at the University of Notre Dame.
5. Basile, F., Chiacchio, P. & Giua, A. (2001) Optimal Petri Net Monitor Design. In: Caillaud, B. Darondeau, P., Lavagno, L. & Xie, X. (eds) *Synthesis and Control of Discrete Event Systems*. Kluwer. pp. 141–154.
6. Sochnev, A.N. (2014) *Setevye modeli v sistemakh upravleniya proizvodstvom* [Network Models in Production Control Systems]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University.
7. Kotov, V.E. (1984) *Seti Petri* [Petri nets]. Moscow: Nauka.
8. Peterson J. (1984) *Teoriya setey Petri i modelirovanie sistem* [Petri nets theory and systems modeling]. Translated from English by M.V. Gorbatova, V.L. Torkhov, V.N. Chetverikov. Moscow: Mir.
9. Sochnev, A.N. & Ruban, A.I. (2015) Vector-matrix models Petri nets based modification. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 3(47). pp. 98–103.
10. Baranchikova, S.G. (2015) *Upravlenie mashinostroitel'nyim predpriyatiem* [Management of a Machine-Building Enterprise]. Ekaterinburg: Ural State University.
11. Mustafaeva, D.G. & Mustafaev, M.G. (2013) Expert systems in the organization and management of production processes. *Organizator proizvodstva – Organizer of Production*. 3(58). pp. 20–23.
12. Novikov, F.A. (2009) *Diskretnaya matematika dlya programmistov* [Discrete Mathematics for Programmers]. 3rd ed. St. Petersburg: Piter.