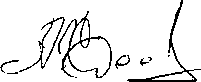
МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)



**На правах рукописи**

**04201360789**

***Хадеев Антон Сергеевич***

**Моделирование и управление технологическими объектами с дискретным поведением с использованием теории супервизорного управления**

Специальность 05.13.06. - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н. Л.И. Бернер

Москва - 2013

Оглавление 2

Введение 4

[Глава 1. Исследование инструментов моделирования промышленных систем 12](#bookmark1)

1. Дискретно-событийные системы 12
2. [Теория супервизорного управления 13](#bookmark2)
3. СД2С2 14
4. [Основные понятия сетей Петри 15](#bookmark3)
5. [Анализ сетей Петри с помощью матричных уравнений 19](#bookmark6)
6. Моделирование ДСС с помощью сетей Петри 20
7. [Общие сведения о ПЛК 24](#bookmark9)
8. Язык релейно-контактных схем 28
9. Обзор методов синтеза программы для ПЛК 30
10. Выводы по главе, постановка цели и задач диссертации 32

[Глава 2. Супервизорное управление в сети Петри 35](#bookmark11)

1. Метод синтеза супервизора 35
2. Моделирование и синтез супервизора для стрелочного перевода... 38
3. [Трансформация ограничений 43](#bookmark17)
4. Выводы по главе 48

Глава 3. Преобразование супервизорной модели в язык РКС 49

1. Метод преобразования сети Петри в язык РКС 49
2. Преобразование супервизорной модели в язык РКС 53
3. Метод подстановок 58
   1. [Выводы по главе 65](#bookmark32)

[Глава 4. Применение метода синтеза на примере ж.д. перевода 66](#bookmark33)

1. Подстановка одной модели 68
2. Подстановка нескольких конкурирующих моделей 79
3. [Выводы по главе 88](#bookmark45)

Заключение 90

[Список литературы 93](#bookmark46)

**Актуальность исследования**

Решение задачи комплексного управления современными производственными предприятиями в настоящее время предполагает определённую динамичность в формировании управленческих алгоритмов. Современное промышленное предприятие должно быть гибким, должно уметь адаптироваться к изменившимся требованиям к технологическому процессу [1]. Традиционное программирование может оказаться недостаточным в условиях изменяющихся целей управления.

В последние годы ведутся активные исследования особого класса моделей систем, в основном технических, динамика развития в которых происходит по возникновению событий, как внешних, так и внутренних. Данный класс носит название дискретно-событийных систем (Discrete-Event Systems, ДСС). ДСС нашли применение в вычислительной технике, робототехнике, управлении трафиком, логистике и пр. Столь широкое распространение объясняется развитой методологией, включающей в себя методы моделирования и решения задач логического управления. Основные математические модели ДСС - это конечно-автоматные модели, сети Петри и модели случайных процессов, такие, как Марковские цепи и теория последовательностей.

Стремительно развивается теория супервизорного управления, исследующая методы логического управления в дискретно-событийных системах. Однако, несмотря на большой объём теоретических исследований в области супервизорного управления, практическому применению методологии уделено значительно меньше внимания.

Некоторыми из возможных областей применения ДСС являются промышленная автоматизация и диспетчерское управление. Дискретно­событийные модели хорошо подходят для описания работы и взаимодействия промышленного оборудования. Типичным промышленным устройством управления является программируемый логический контроллер (ПЛК). Существует набор стандартов, описывающих техники программирования для создания программ для ПЛК, но эти техники относятся скорее к формальному описанию методов программирования, тогда как логика управления программы

контроллера формируется программистом в меру его знаний и представлений, в том числе и о работе системы.

Роль управляющего элемента (супервизора - внешнего агента, управляющего системой) в моделях систем промышленной автоматизации сводится к координации дискретных действий механизмов. Алгоритм подобных взаимодействий представляет из себя программу для программируемых логических контроллеров, написанную на стандартизованном языке. Традиционно, для программирования ПЛК используют язык релейно-контактных схем (РКС), известный также как язык лестничной логики или Ladder Diagram (LD).

Часто в качестве инструмента для моделирования ДСС используются конечные автоматы и формальные языки, что обусловлено выбором данного инструмента в фундаментальных исследовательских работах теории супервизорного управления [2]. Однако при увеличении размерности системы этот инструмент сталкивается с проблемой «взрыва состояний», состоящей в том, что конечный автомат должен описывать все возможные состояния системы. Использование в качестве инструмента моделирования сетей Петри помогает решить эту проблему. Сети Петри просты для понимания, обладают хорошим аппаратом математического анализа, включающим в себя линейную матричную алгебру. Вдобавок, они обладают удобным графическим представлением, что делает возможным визуализацию процесса выполнения сети, а также позволяет наглядно увидеть взаимосвязи частей системы.

Задача исследования и разработки методики синтеза программы для ПЛК на основе модели, описывающей работу системы с учётом желаемого её поведения, является актуальной и востребованной задачей, включающей в себя как прикладную, так и научную составляющие.

Современное промышленное предприятие должно быть гибким, должно уметь адаптироваться к изменившимся требованиям к технологическому процессу. Методика позволяет автоматически формировать программу поведения для ПЛК при изменении задачи управления. Также нужно отметить, что использование предложенного подхода должно снизить вероятность человеческой ошибки, упростить их поиск и исправление.

**Методологическая и теоретическая основа исследования**

Подробное описание дискретно-событийных систем, а также обобщение

известных методов для анализа данных систем дано в работе К. Кассандраса и Г. Лафортуна [3]. Логическое управление дискретными процессами рассмотрели Юдицкий С.А. и Магергут В.З. [4].

Основные положения теории супервизорного управления в дискретно­событийных системах сформулированы в работах П. Рамаджа и В. Вонхэма [2]. В дальнейшем теория была расширена и развита как самими авторами, так и другими исследователями, рассмотревшими такие аспекты теории управления, как наблюдаемость, контролируемость, модульный, децентрализованный и иерархический подходы, применение сетей Петри и пр.

Теория сетей Петри системно изложена в монографиях Д. Питерсона [5] и

В.Е. Котова [6].

В работе К. Ямалидоу, Д. Муди и П. Антсаклиса [7] предложен метод синтеза супервизора сетью Петри для ДСС, также смоделированной сетью Петри. Метод основан на концепции инварианты позиций в сети Петри и применим к системам, ограничения для которых могут быть выражены логическими формулами, алгебраическими уравнениями или неравенствами. Размер супервизора пропорционален количеству налагаемых на систему ограничений. Позже, Д. Муди и П. Антсаклис расширили этот метод для работы с неконтролируемыми и ненаблюдаемыми переходами [8].

Жанг Яо-Яо и Ян Ганг-Фенг [9] рассмотрели расширенные ограничения для синтеза супервизора. Хонг-Йе Су, Вей-Мин By и Джиан Чу в обзоре [10] рассмотрели проблемы тупиков.

**Цель работы и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является повышение гибкости технологического оборудования, его адаптация к изменяющимся требованиям технологического процесса за счёт разработки и использования методики моделирования и управления технологическими объектами, описывающей логику функционирования промышленной системы с учётом желаемого её

**6**

поведения. Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследовать применение дискретно-событийных систем и сетей Петри для моделирования промышленной системы, состоящей из различных устройств.
2. Сформировать супервизорную модель системы, обеспечивающую желаемое поведение системы в соответствии с заданными ограничениями.
3. Исследовать традиционные методы программирования ПЛК, обосновать использование языка релейно-контактных схем.
4. Разработать алгоритм синтеза программы на языке релейно-контактных схем для ПЛК на основе имеющейся модели технологического объекта, представленной сетью Петри.
5. Провести исследование работы алгоритма синтеза применительно к сложным системам, состоящим из совместно работающих устройств.
6. Рассмотреть практическое применение предложенных методов для технологического оборудования.

Объект исследования - технологическое оборудование с дискретным поведением (промышленная автоматика, вычислительная техника, робототехника, управление трафиком, логистика и пр.).

Предмет исследований - методика, включающая моделирование технологического оборудования с дискретным поведением при условии динамического изменения целей управления и синтез логического управления для него.

Научная новизна работы в оригинальном алгоритме преобразования сети Петри в язык РКС, в комплексном подходе, включающем в себя все этапы, начиная от моделирования объекта и заканчивая синтезом программы на языке РКС.

Методика предусматривает работу со сложными моделями, которые делятся на несколько упрощённых, для каждой из которых формируются отдельные логические условия (и программа на языке РКС), наконец, упрощённые модели объединяются в цельное логическое условие согласно исходной модели и предложенным правилам композиции. С помощью

7

предлагаемой методики появляется возможность повысить уровень автоматизации при проектировании промышленных систем за счёт элементов автоматизированного создания программного обеспечения, а также обеспечить защиту от ошибок оператора.

На защиту выносятся следующие результаты:

* Комплексная методика моделирования и синтеза управления для технологических объектов с дискретным поведением, включая схему формирования спецификации ограничений для исследуемой системы, обеспечивающую её желаемое поведение. Ограничения могут быть выражены как уравнения или неравенства. В качестве инструмента моделирования используются сети Петри;
* Алгоритм преобразования модели, построенной с использованием инструмента сетей Петри, в программу для вычислительных устройств, управляющих технологическим оборудованием — программируемых логических контроллеров;
* Методика композиции вложенных моделей, которая предполагает разбиение сложной модели на ряд вложенных (условно принимаемых за отдельные устройства), применение метода преобразования отдельно для каждой из простых моделей (синтез для них логических условий) и, наконец, композиции их в исходную модель, с соблюдением заданных правил объединения.

Практическая ценность результатов работы заключается в том, что разработанные модели, механизмы, схема и концепция методики синтеза логического управления для различных дискретно-событийных систем создают методологическую базу для модернизации действующих систем управления технологическими объектами и разработки новых, путём синтеза программного обеспечения для ПЛК.

**Апробация и внедрение результатов исследования**

Основные результаты работы были доложены и одобрены на 13-м

симпозиуме IF АС по проблемам информационного управления, проходившем в Москве в 2009 г., а также семинарах ИПУ РАН.

Основные положения диссертации были использованы в проекте системы линейной телемеханики ООО «Газпром трансгаз Чайковский», а также проекте АСУТП объекта управления железнодорожной эстакады налива товарно­сырьевой базы №1 (ТСБ-1) Омского нефтеперерабатывающего завода (ОНПЗ), реализованных компанией ЗАО «АтлантикТрансгазСистема» (Москва). Для оборудования технологических объектов автором были разработаны алгоритмы, определяющие их поведение, включая алгоритмы противоаварийных защит и блокировок (ПАЗ). На основании этих алгоритмов были построены модели поведения оборудования и сформулированы спецификации, обеспечивающие поведение оборудования в соответствии с алгоритмами, построены супервизорные модели. С помощью предложенной методики супервизорные модели были преобразованы к языку релейно-контактных схем, далее используемому в качестве программ для программируемых логических контроллеров оборудования ПАЗ.

**Публикации**

По материалам диссертации опубликованы семь печатных работ, из них две в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК.

**Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертационной работы 95 страниц машинописного текста, включает 12 таблиц и 45 рисунков.

**Содержание работы**

В главе 1 приводится обзор существующих методов моделирования дискретно-событийных систем и методов логического управления в них.

<1 л

Уделено внимание методологии СД С , как оригинальному пути развития идей

9

супервизорного управления. Сделан краткий обзор основных понятий и определений сетей Петри, методов анализа сетей Петри с помощью матричной алгебры и применения сетей Петри для моделирования ДСС.

В главе 2 рассмотрены программируемые логические контроллеры и традиционные методы программирования логики ПЛК. Рассмотрен также язык релейно-контактных схем как традиционно наиболее применяемый для разработки программ для ПЛК. Обозначена основная проблема современных методов программирования, заключающаяся в том, что развиваются в основном технические схемы формирования программ, тогда как логике поведения уделено внимания гораздо меньше.

В главе 3 приведён подробный анализ применения теории супервизорного управления для моделей в сетях Петри. Супервизор, построенный в сети Петри представляет из себя дополнительные позиции, включаемые о исходную сеть Петри, представляющую модель технологического объекта. Количество позиций (размер супервизора) прямо пропорционально количеству наложенных на модель объекта ограничений. Ограничения могут быть заданы как логические равенства или неравенства. Приведён пример формирования супервизора для части алгоритма железнодорожного стрелочного перевода. Описана методика преобразования модели в сети Петри в язык релейно­контактных схем. Сам метод представлен в виде подробного пошагового алгоритма, что позволяет реализовать его в виде программного инструмента в дальнейшем. Подробно разобран метод преобразования сложной модели объекта, заключающийся в предварительном разбиении её на ряд простых (обозначенных как устройства), преобразовании каждой из них в набор логических условий (промежуточное звено для программы на языке РКС), наконец, приведён метод подстановок для дальнейшей композиции логических условий этих моделей в цельное логическое условие и формирования итоговой программы на языке РКС.

В главе 4 рассмотрено применение методики к полному алгоритму

железнодорожного стрелочного перевода, взятому из проекта рабочей

10

документации для автоматизации железнодорожной эстакады налива ТСБ №1 ОНПЗ, разработанной автором. Алгоритм разбит на ряд моделей, построенных в сетях Петри, для которых далее сформированы логические условия. Заключительным этапом разбора примера стала программа на языке РКС, реализующая работу приведённого алгоритма.

В заключении приводятся результаты диссертационной работы и возможные направления для дальнейшего развития.

Изложенная в предыдущей главе методика применена для железнодорожного стрелочного перевода, алгоритм поведения которого взят из рабочей документации на АСУТП эстакады ТСБ-1 Омского Нефтеперерабатывающего завода. Алгоритм предполагает ряд проверок, по результатам которых будут разрешены или запрещены действия по переводу стрелки (например, стрелку нельзя переводить если на ней находится вагон). Каждая из проверок смоделирована как отдельное устройство, для них построены сети Петри, выделены ограничения, синтезированы супервизоры.

Применение методики позволило получить для каждой модели программу на языке релейно-контактных схем. Частные модели устройств в дальнейшем были объединены в одну, общую модель согласно методу подстановок.

Конечным результатом работы методики стала программа на языке РКС, реализующая работу приведённого алгоритма.

В диссертации поставлена и решена важная техническая задача - повышение надёжности создания программных средств для управления технологическими процессами вследствие снижения риска ошибок персонала при разработке программных средств. Это достигнуто путём разработки методики автоматизированного синтеза программ для устройств управления технологическими процессами - программируемых логических контроллеров. Методика основана на известных теориях сетей Петри и супервизорного управления для дискретно-событийных систем, для которой исследованы и развиты новые методы преобразования моделей в язык релейно-контактных схем - традиционный язык программирования ПЛК.

Цель работы достигнута благодаря следующим теоретическим и практическим результатам:

1. Рассмотрено практическое применение активно развивающейся теории дискретно-событийных систем для моделирования промышленных технологических объектов. Этот результат тем более важен, что несмотря на большое количество теоретических исследований в данной области, практическому их применению уделено гораздо меньше внимания.
2. Исследована концепция супервизорного управления и предложено её применение к синтезу управления в модели технологического объекта, смоделированном сетью Петри. Супервизор также представляет из себя сеть Петри, дополняющую исходную сеть Петри модели объекта таким образом, что она ограничивает поведение объекта, позволяя только желаемое её поведение. Необходимые ограничения для задания желаемого поведения задаются в виде спецификации и могут представлять из себя логические равенства или неравенства.
3. Традиционная схема программирования программируемых логических контроллеров предполагает разработку программного кода

специалистом на основе его знаний о технологическом объекте и своей профессии. Развитие методов программирования ПЛК сводится к совершенствованию нотации языков программирования, тогда как развитию формальных правил для логики поведения уделено мало внимания. Наиболее популярным языком для программирования ПЛК является язык релейно-контактных схем, иначе называемый языком лестничной логики.

1. Разработан метод преобразования модели объекта, представленной сетью Петри в программу на языке релейно-контактных схем. Метод предусматривает сопоставление позиций и переходов сети Петри входным и выходным параметрам ПЛК (комбинированная схема взаимодействия модели сети Петри с внешним миром по позициям и переходам), после чего осуществляется преобразование сети Петри в логические условия таким образом, чтобы для подачи сигнала на выходные позиции ПЛК было осуществлено наличие или отсутствие сигнала на определённом наборе входных.
2. Разработана методика применения метода преобразования для сложных моделей, которые разбиваются на ряд простых, представляющих собой отдельные модели устройств. Для каждой простой модели применяется метод преобразования в язык РКС, после чего логические условия простых моделей объединяются в соответствии с приведёнными правилами объединения. Приведены две схемы композиции логических условий: для конкурирующих простых моделей и для совместных простых моделей.
3. Предложенная методика исследована на реальном технологическом

объекте - железнодорожном стрелочном переводе, входящем в проект

железнодорожной эстакады налива товарно-сырьевой базы №1 Омского

нефтеперерабатывающего завода. В рамках проекта автоматизации для

данного технологического объекта, разработанного автором, был

разработан алгоритм поведения железнодорожного стрелочного

91

перевода, основываясь на котором была разработана его модель и логические условия для его поведения. Конечным итогом применения методики стала программа на языке релейно-контактных схем, реализующая поведение, предусмотренное алгоритмом. Программа синтезирована в том виде, в каком может быть задана в ПЛК.

Предложенная методика может быть реализована в виде программного инструмента, позволяющего разработчику программ для ПЛК составить в нём модель технологического объекта и получить готовый код для конкретного типа контроллера. Для этого методика приведена в виде подробного пошагового алгоритма.

**Список литературы**

f.

1. Амбарцумян А.А., Хадеев А.С. Анализ функциональности систем управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования // Проблемы управления. - 2005.-№6.-с. 2-12.
2. Ramadge P.J.G., Wonham W.M. The Control of Discrete Event Systems // Proceedings of the IEEE. - 1989. - Vol. 77, № 1. - p. 81-98.
3. Cassandras C., Lafortune G. Introduction to Discrete Event Systems. 2-nd ed. - Springer, 2008.-771 p.
4. Юдицкий C.A., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. - М.: Машиностроение, 1987. - 176 с.
5. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984.-264 с.
6. Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. - 160 с.
7. Yamalidou К. et al. Feedback Control of Petri Nets Based on Place Invariants // 33rd IEEE Conference on Decision and Control. - Lake Buena Vista, 1994. - Vol. 3. - p. 3104-3109.
8. Moody J.O., Antsaklis P.J. Petri Net Supervisors for DES with Uncontrollable and Unobservable Transitions // IEEE Transactions on Automatic Control. - 2000. — Vol. 45, № 3. - p. 462-476.
9. Zhang Y., Yan G. Synthesis of petri net supervisors enforcing general constraints // Journal of Zhejiang University SCIENCE A. - 2006. - Vol. 7, № 4. - p. 623-628.
10. Su H., Wu W., Chu J. Liveness Problem of Petri Nets Supervisory Control Theory for Discrete Event Systems // Acta Automatica Sinica. -2005. - Vol. 31, № 1. — p. 143-150.
11. Амбарцумян А.А. Структурированные динамические дискретно-событийные системы // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения УКИ’08. ИПУ РАН, - 2008. - с. 268-288.
12. Иванов Н.Н., Михайлов Г.И., Руднев В.В. Конечные автоматы: эквивалентность и поведение. - М.: Наука, 1984. - 192 с.
13. Ambartsumyan A.A. et al. Direct Method of Supervisor Implementation for Structured Discrete Dynamic Event System // 13th IF AC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. - 2009. - Vol. 13, Part 1. - p. 486-491.
14. Амбарцумян A.A. Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 8. — с. 156-176.