

УДК 004.89

Агентоцентрическое моделирование организационно-технологических систем

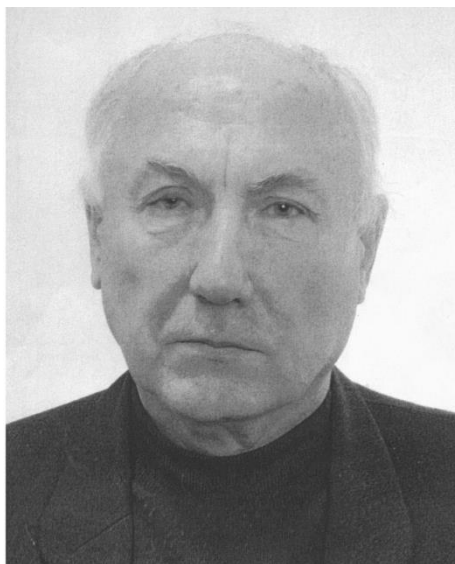
Игнатенко В. А., Бажанов А. Г., Юдин Д. А.,
Чуев А. В., Юдицкий С. А.

Постановка задачи: разработка эффективных систем управления организационными и технологическими системами (ОТС) требует проведения их моделирования и программно-аппаратной реализации, которые обеспечивают повышение качества продукции того или иного технологического процесса, снижение затрат на производство, улучшение производительности или условий труда персонала. Для ряда объектов, например, вращающихся цементных печей мокрого способа производства, установок по выращиванию кристаллов сапфира, сложно построить аналитическую модель системы управления. В связи с этим предлагается исследование интеллектуальных методов и сетевых подходов для реализации этой задачи. **Целью работы** является развитие, расширение и формализация методологии моделирования ОТС в рамках работ, проведенных в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова под научным руководством проф. В.З. Магергута. Для достижения поставленной цели использовались несколько концептуальных путей: применение сетевой модели при обработке аналоговой информации, применение нечетких диаграмм поведения узлов для построения моделей и синтеза управляющих автоматов для сложных технологических объектов, применение технического зрения в системе управления сложным технологическим объектом, формализация и анализ дискретных организационно-технологических систем со структурированными агентами на индикаторных сетях. **Используемые методы:** в качестве методов решения задачи агентоцентрического моделирования использовались методы сетей Петри, в том числе их модификаций – информационных и бинарных индикаторных, методы нечетких диаграмм поведения узлов, методы нейронных сетей, в частности карт Кохонена, методы классификации данных, в том числе, метод опорных векторов и метод экстремального обучения. **Новизна:** элементами новизны представленного решения являются: предложенная информационная сеть Петри для обработки аналоговой информации; методика построения моделей и синтеза управляющих автоматов для сложных технологических объектов на основе нечетких диаграмм поведения узлов; способ оценки состояния зоны спекания и параметров процесса обжига вращающейся печи на основе распознавания изображений; структура советующей системы управления вращающейся цементной печью с применением технического зрения; сетевые модели ОТС на основе бинарных индикаторных сетей и концепции «Обеспечение-Обслуживание-Отчетность». **Результат:** описанные в настоящей статье подходы показали свою эффективность при решении практических задач. С помощью информационной сети Петри успешно осуществлено моделирование динамики замкнутой системы управления. Применение нечетких диаграмм поведения узлов позволили адекватно формировать советы по управлению вращающейся печью. Применение системы технического зрения позволило осуществить оценку состояния зоны спекания с точностью в среднем выше 94%, а также использовать визуальные данные в системе управления печью, тем самым повысив оперативность принятия решений операторами на 12%. С применением бинарных индикаторных сетей получена адекватная модель установки по выращиванию искусственных сапфиров, разработана бинарная сетевая дорожная карта обеспечения информационной безопасности регионального многофункционального центра. **Практическая значимость:** полученные результаты внедрены на цементном заводе ЗАО «Осколцемент» (г. Старый Оскол), а также в Многофункциональном центре предоставления государственных и муниципальных услуг Белгородской области.

Ключевые слова: агентный подход, информационная сеть Петри, бинарная индикаторная сеть Петри, нечеткая диаграмма поведения, нечеткое управление, система технического зрения, оценка состояния, метод экстремального обучения, вращающаяся цементная печь.

Памяти профессора Валерия Залмановича Магергута

11 мая 2016 года ушел из жизни организатор и активный участник работ по современной прикладной информатике, замдиректора по научной работе Института информационных технологий и управляющих систем при Белгородском государственном технологическом университете (БГТУ) им. В.Г. Шухова, доктор технических наук, профессор Валерий Залманович Магергут.



Валерий Залманович Магергут (1941 - 2016)

Валерий Залманович родился 11 ноября 1941 года в городе Чапаевск Самарской области. После окончания школы в 1958 г. поступил в Новочеркасский политехнический институт, который закончил с отличием в 1963 г. Далее по распределению 3 года работал инженером на предприятиях министерства общего машиностроения, а в 1966 г. был принят в аспирантуру Днепропетровского химико-технологического института. В 1969 г. по завершении аспирантуры был направлен в Новомосковский филиал Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, где проработал 37 лет, вплоть до 2006 г., последовательно занимая должности ассистента, ст. преподавателя, доцента, профессора кафедры «Автоматизация производственных процессов» и параллельно декана факультета. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 2001 г. – докторскую. В «новомосковский» период проявилась широта научных интересов Валерия Залмановича. Он развил модели и методы управления роботизированными комплексами, используемыми в гибких автоматизированных производствах машиностроительного типа, применительно к условиям химико-технологических производств, разработал принципы построения, методы анализа, синтеза и применения адаптивных регуляторов в химической промышленности (тема докторской диссертации). В.З. Магергут участвовал в разработке гибридных моделей управления на основе взаимодействия ее дискретной и непрерывной частей. А также занимался другими новыми интересными вещами, он автор нескольких изобретений.

В 2006 г. Валерий Залманович перешел работать в Белгород в БГТУ им. В.Г. Шухова, где он как продолжил выполненные в Новомосковске работы, так и инициировал новые направления, ставшие предметом успешно защищенных 4-х кандидатских диссертаций аспирантами В.З. Магергута. Читатели могут оценить широту научных взглядов и глубину научного поиска В.З. Магергута по предлагаемой статье, состоящей из 4-х разделов, написанных его учениками. Первый раздел «Применение сетевой модели при обработке аналоговой информации» написан В.А. Игнатенко. Второй раздел «Применение нечетких диаграмм поведения узлов для построения моделей и синтеза управляющих автоматов для сложных технологических объектов» написан А.Г. Бажановым. Третий раздел «Применение технического зрения в системе управления сложным технологическим объектом» написана Д.А. Юдиным. Четвертый раздел «Формализация и анализ дискретных организационно-технологических систем со структурированными агентами на индикаторных сетях» написан А.В. Чуевым (научный консультант по этой работе проф. С.А. Юдицкий). Необходимо отметить, что еще несколько аспирантов продолжают работать над своими исследованиями, которые развивают идеи, родоначальником которых являлся В.З. Магергут. Несомненно, его идеи и дальше будут жить и развиваться в трудах учеников.

В.З. Магергут был не только известным ученым, создавшим в БГТУ им. В.Г. Шухова школу агентоцентрического моделирования, но и необыкновенно светлым, скромным, добрым, отзывчивым, надежным человеком, готовым всегда прийти на помощь. Его отличали чувство ответственности, требовательность к себе, высокая работоспособность и самоотдача.

Пусть земля ему будет пухом.

С.А. Юдицкий

Введение

Известно широкое применение при автоматизации организационно-технологических систем (ОТС) различного назначения структур на базе автономных «интеллектуальных» единиц – агентов, образующих многоагентные сети. Такой подход был назван агентоцентрическим (агентиориентированным). Инициатором работ по развитию и совершенствованию агентоцентрических методов моделирования функционирования и управления ОТС в БГТУ им. В.Г. Шухова был зам. директора по науке Института информационных технологий и систем управления при БГТУ, доктор технических наук, профессор В.З. Магергут. Начиная с 2012 г. под его научным руководством выполнены и успешно защищены 4 кандидатские диссертации, в которых исследовались как внутренние структуры агентов, так и сети связи между агентами. Разработанные методы внедряются, и частично уже внедрены, на ряде Белгородских предприятий. Результаты внедрения, в первую очередь программное обеспечение, представлены в диссертациях в виде реальных примеров, подтверждающих принятые теоретические решения.

Целью данной статьи является развитие, расширение и формализация методологии моделирования ОТС в рамках работ, проведенных в БГТУ им. В.Г. Шухова под научным руководством В.З. Магергута. Для достижения поставленных целей использовалось несколько концептуальных путей, частично совместимых между собой, которые подробно описаны ниже.

1. Применение сетевой модели при обработке аналоговой информации¹

1.1. Актуальность. При решении задач анализа и синтеза систем автоматического управления в первую очередь необходимо выбрать способ математического описания исследуемой системы. Результат выбора зависит от множества факторов, таких как проработанность математического аппарата, характер поведения системы, полнота информации об объекте, способ физической реализации закона управления и многое другое.

При реализации задач промышленной автоматизации зачастую решающими факторами становятся скорость реализации системы управления и простота ее дальнейшего обслуживания и модификации. Учитывая эти требования, предпочтение обычно отдается комплексу лингвистических средств, полностью или частично оперирующих графическими средствами описания систем [1].

Учитывая, что большинство современных систем управления физически реализуются на базе цифровых вычислительных устройств (промышленные контроллеры, специализированные цифровые устройства на базе микроконтроллеров, промышленные компьютеры и т.д.), то в конечном итоге разрабатываемый закон управления должен быть представлен в виде исполняемого алгоритма.

Одним из способов представления алгоритма управления в графической форме является применение сетей Петри. Существует множество разновидностей этого математического аппарата, отличающихся различным способом описания состояния системы и целевой функции. Так, например, помеченные сети Петри предусматривают описание последовательности состояний рассматриваемой системы и пути перехода между этими состояниями, выбираемыми в зависимости от внешних условий. Однако для этого способа необходимо, чтобы множество условий и множество состояний могли быть описаны логическими функциями, что подразумевает работу только с дискретными переменными.

1.2. Постановка задачи. Вследствие описанных требований к средствам проектирования возникает задача дискретизации сигналов, характеризующих состояние объекта управления. Процесс дискретизации изначально непрерывной модели системы является нетривиальной задачей, требующей выполнения таких требований как сохранение устойчивости, отсутствие потери

¹ Эта часть статьи написана В.А. Игнатенко по результатам его диссертационных исследований, выполненных под руководством проф. В.З. Магергута.

информации вследствие дискретизации по времени, учет таких особенностей дискретных законов управления как гистерезис и т.д.

Альтернативным решением этой задачи является применение математического инструмента изначально обладающего преимуществами простоты представления алгоритма в виде сети Петри и возможности оперирования аналоговой информацией.

1.3. Описание принципов функционирования информационной сети Петри. В качестве инструмента, удовлетворяющего описанным выше требованиям, предлагается использовать информационную сеть Петри (ИСП) [2], в которой, подобно графу операций [3] присутствует два типа вершин: позиции и переходы. Позиции, обозначаемые нумерованными кружками, соответствуют выполняемым технологическим или внутренним математическим операциям. Переходы в отличие от классической сети Петри дополнены двумя информационными входами (повышающий информационный вход помечается символом «+», а понижающий информационный вход – символом «-»). В ИСП вводится особый тип дуги – информационная дуга. В отличие от обычной дуги она не переносит фишку, а лишь передает информацию о наличии фишки в соответствующей позиции. Начало информационной дуги может находиться только в позиции и для отличия от обычной дуги помечается «крестиком». Конец информационной дуги, обозначаемый «стрелкой» должен быть соединен только с информационным входом перехода. Информационная дуга характеризуется коэффициентом передачи. Для его обозначения в разрыв дуги вставляется треугольник с вписанным в него значением. Отсутствие треугольника эквивалентно единичному коэффициенту передачи. В случае, когда информационная дуга заканчивается стрелкой на боковой грани треугольника, коэффициент передачи задается этой информационной дугой.

Для упрощения описания взаимодействия сети внешними системами допускается начинать и заканчивать информационную дугу не на вершинах графа (позициях и переходах соответственно), а на отметках входа (обозначаемых InX) и выхода (обозначаемых OutY). Фактически они будут являться точками поступления входных сигналов для сети и выходных воздействий, генерируемых сетью.

Фишка, предназначенная для того, чтобы определить к какому из множества возможных состояний в данный момент принадлежит система, в отличие от помеченной сети Петри, перестала быть неделимым элементом. Вводится понятие «массы» фишки, являющееся численным значением степени принадлежности системы к некоторому состоянию. Масса фишки выражается числом, лежащим в диапазоне [0; 1].

Пример использования основных элементов информационной сети Петри представлен на рис. 1.1.

Основным элементом, обеспечивающим перенос массы фишки из одной позиции в другую, является переход. Можно выделить две функции перехода: передающую и информационную. Передающая функция реализует непосредственно перенос фишки (точнее массы фишки, то есть фишка может

быть перенесена не полностью) из одной позиции в другую. Информационная функция заключается в управлении условием переноса фишки.

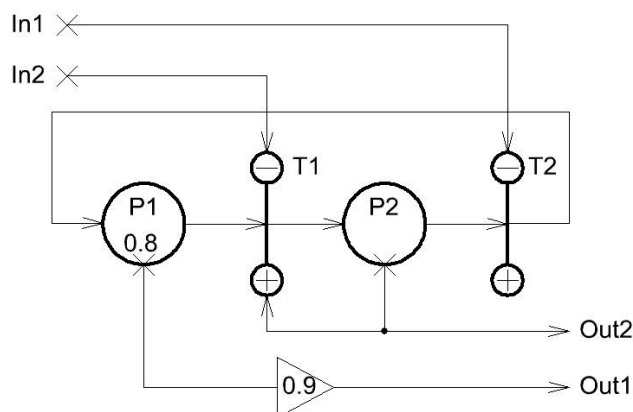


Рис. 1.1. Пример графического изображения ИСП

В отличие от сети Петри, условие срабатывания перехода не является стационарным и может зависеть как от состояния самой сети, так и от внешних входных сигналов. Условие переноса массы может быть описано функцией передачи перехода, изображенной на рис. 1.2.

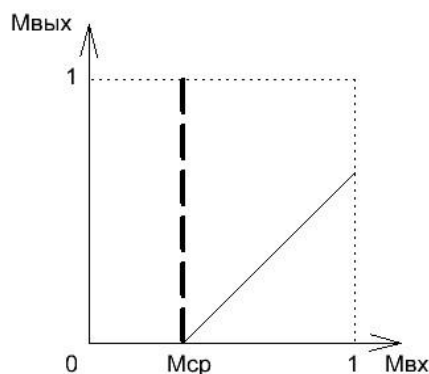


Рис. 1.2. Функция передачи перехода

В соответствие с графиком, переход срабатывает, то есть начинает осуществлять перенос массы только после того, как разница между массой фишек в позициях связанных с данным переходом входящими (M_{BX}) и исходящими ($M_{ВЫХ}$) дугами превысит некоторое пороговое значение (M_{CP}). Кроме того, передаваемая переходом масса пропорциональна этой разнице.

Так как количество дуг, связанных с переходом неограниченно, а входом функции передачи является суммарное значение $M_{вх} = \sum_{i=1..n} P_i$, где n – общее количество входных дуг, $M_{вх}$ – масса фишек во всех позициях, связанных со входом перехода, P_i – масса фишки в одном переходе, связанном входной дугой.

Переход может быть в открытом (сработавшем) и закрытом (неактивном) состоянии. Согласно функции передачи перехода он считается сработавшим,

если $M_{вх} > M_{ср}$, где $M_{ср}$ – порог срабатывания перехода. В случае выполнения этого условия выполняются следующие действия: уменьшение массы в позициях, связанных входящими дугами и увеличение массы в позициях, связанных исходящими дугами. Для обработки всей сети необходимо выполнить эти действия для всех переходов:

$$P_i = P_i - \left(\sum_{i=1,n} (1 - P_j) - Pos \left(\sum_{i=1,n} (1 - P_j) - \sum_{i=1,n} (P_i) \right) \right) \cdot \frac{P_i}{\sum_{i=1,n} P_i} \cdot \left(\sum_{i=1,n} P_i - M_{ср} \right), \quad (1)$$

$$P_j = P_j + \left(\sum_{i=1,n} (1 - P_j) - Pos \left(\sum_{i=1,n} (1 - P_j) - \sum_{i=1,n} (P_i) \right) \right) \cdot \frac{(1 - P_j)}{\sum_{j=1,m} (1 - P_j)} \cdot \left(\sum_{i=1,n} P_i - M_{ср} \right), \quad (2)$$

где P_i – позиция, связанная входящей дугой; n – количество входящих передающих дуг; P_j – позиция, связанная с переходом, исходящей дугой; m – количество исходящих передающих дуг; $Pos(x)$ – кусочно-линейная функция вида:

$$\begin{cases} Pos(x) = x, & \text{при } x \geq 0, \\ Pos(x) = 0, & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Информационная функция перехода, заключающаяся в управлении порогом срабатывания, заключается и может быть описана в виде функциональной зависимости порога срабатывания ($M_{ср}$) от состояния информационных входов перехода (повышающего и понижающего).

При отсутствии у перехода связанных с ним информационных дуг порог срабатывания принимается равным 0, в противном случае определяется как

$$M_{ср} = \sum_{x=1..n} P_x \cdot k_x - \sum_{y=1..m} P_y \cdot k_y, \quad (4)$$

где k_x – коэффициент передачи дуги, связывающей переход P_x с повышающим информационным входом, k_y – коэффициент передачи дуги P_y , связывающей переход P_y с понижающим информационным входом.

Вся информация, поступающая в систему, хранится и обрабатывается в сети в виде распределения масс по позициям. Вследствие этого входные и выходные сигналы должны быть нормированы в диапазоне [0; 1].

Разработку структуры системы автоматического управления с использованием ИСП можно разделить на два этапа: структурный синтез и параметрический синтез.

На этапе структурного синтеза задается множество возможных состояний системы и условий переходов, то есть формируется граф, в котором позиции должны быть связаны с переходами таким образом, чтобы стало возможным выполнение сетью заданного алгоритма поведения.

Параметрический синтез заключается в выборе коэффициентов передачи информационных дуг. Изменение этих параметров качественно влияет на поведение системы. По аналогии с нейронными сетями этот процесс будем называть «обучением» сети.

1.4. Пример применения ИСП для моделирования динамических объектов. В качестве примера применения ИСП можно привести моделирование объекта, чья динамика может быть описана апериодическим звеном.

Для моделирования апериодического звена формируется сеть, состоящая из позиций $P1$, $P2$ и переходов $T1$, $T2$ в соответствии с рис. 1.3.

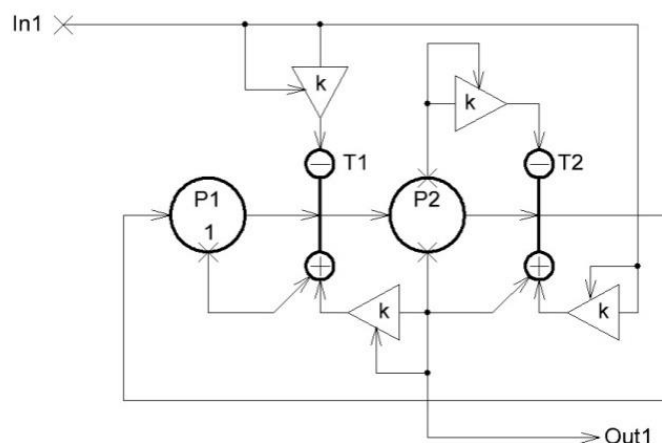


Рис. 1.3. Модель апериодического процесса

Так как данная структура моделирует динамическое поведение объекта, то для ее работы необходим циклический пересчет сети на протяжении заданного времени, при этом каждый проход множества переходов занимает фиксированное время, называемое тактом.

Применяя итеративные функции (1, 2, 4) и принимая величину такта за единицу, получаем переходную характеристику модели. Результатом моделирования является ступенчатая функция (рис. 1.4), которая в точках разрыва приближается к непрерывной экспоненциальной функции:

$$\text{Out1}(t) = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \cdot \text{In1}(t). \quad (5)$$

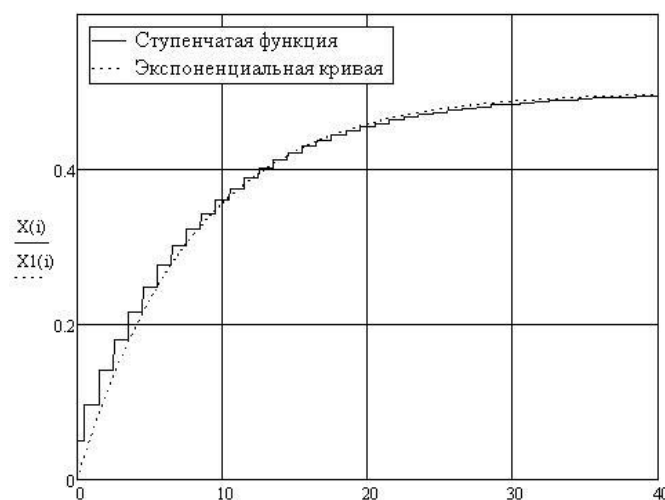


Рис. 1.4. Динамика реакции сети ИСП на ступенчатое воздействие

Для практического применения данной модели при построении более сложных систем необходимо решить задачу параметрического синтеза. В частном случае, для приведенной структуры апериодического звена была найдена зависимость:

$$K = \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\tau}} + \frac{1}{\tau}, \quad (6)$$

где K – коэффициент передачи информационных дуг, τ – постоянная времени апериодического процесса, согласно (5). Учитывая реальную длительность такта обработки сети, равную T_j , уравнение (6) принимает вид:

$$K = \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\tau \cdot T_j}} + \frac{1}{\tau \cdot T_j}. \quad (7)$$

Помимо модели апериодического звена разработано множество других простейших составных блоков (дифференциальные звенья, позиционные блоки, запаздывание и др.) [4], из которых может быть построена более сложная структура.

Рассмотрим этот подход на примере синтеза простейшего замкнутого контура регулирования, структурная схема которого приведена на рис. 1.5.

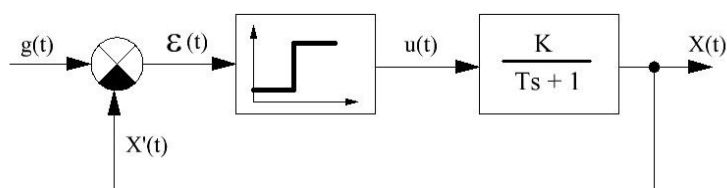


Рис. 1.5. Структурная схема замкнутой системы управления

Используя типовые блоки, такие как апериодическое звено и двухпозиционный регулятор можно сформировать структуру сети (рис. 1.6):

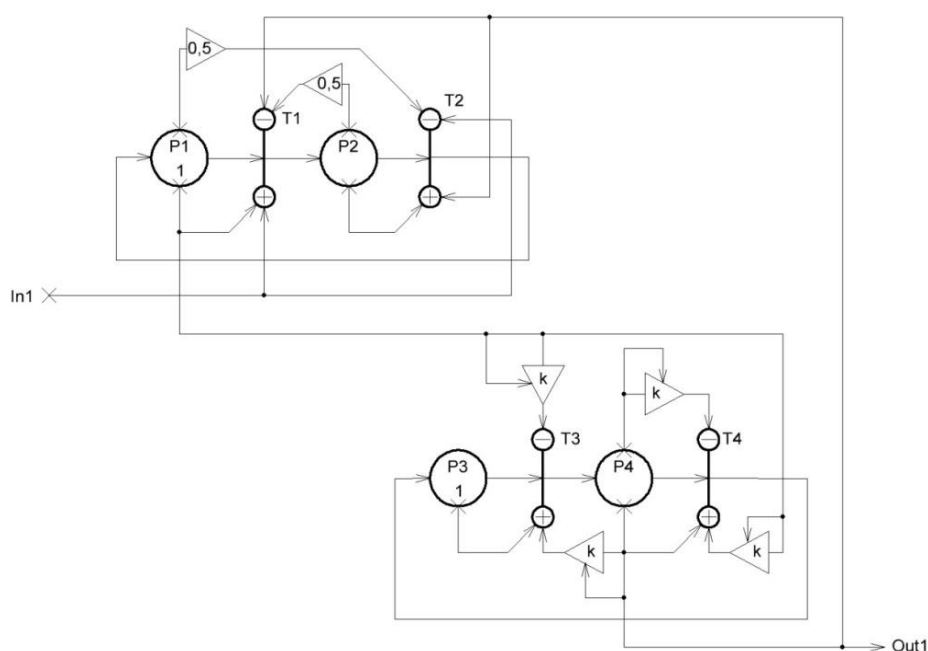


Рис. 1.6. ИСП, реализующая динамику замкнутой системы управления

Применяя итеративный пересчет сети можно получить следующую динамическую характеристику моделируемой системы (см. рис. 1.7). Как видно система приходит в установившийся автоколебательный режим.

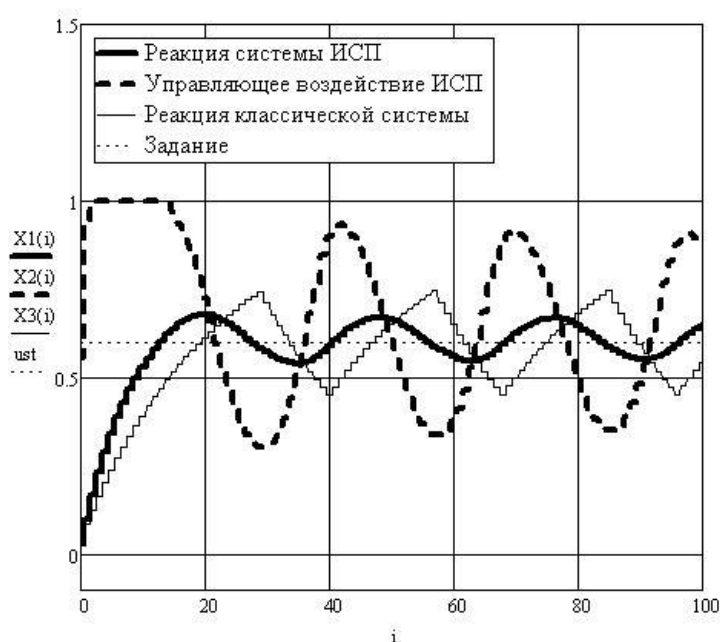


Рис. 1.7. Реакция модели на ступенчатое воздействие

1.5. Выводы. Таким образом, моделирование динамики систем автоматического управления с их последующей реализацией в виде цифровых устройств автоматики при помощи ИСП является наглядным процессом. Изначальный учет требования обработки аналоговых сигналов численными средствами позволяет исключить дополнительную стадию проектирования, заключающуюся в дискретизации разработанных аналоговых моделей.

2. Применение нечетких диаграмм поведения узлов для построения моделей и синтеза управляющих автоматов для сложных технологических объектов²

2.1. Актуальность. Современное состояние промышленности и технологических процессов можно описать как увеличивающее свою сложность для производства с учетом новых запросов с точки зрения качества продукции, скорости ее получения и специфических характеристик. Наряду с этим продолжают существовать сложные технологические процессы, которые на данный момент управляются исключительно человеком или не могут работать без корректировки им управляющих воздействий. Постоянная зависимость от эмоционального, психологического и физического состояния

² Эта часть статьи написана А.Г. Бажановым по результатам его диссертационных исследований, выполненных под руководством проф. В.З. Маггергута.

оператора придает работе таких процессов возможности выхода из устойчивого состояния, формирования ошибочных или катастрофических для объекта управления воздействий и несогласованности работы аппаратов. И если для некоторых систем управления можно сформировать отдельный вектор блокировок, который не позволит развиваться подобным событиям, то для большинства таких объектов блокировки будут достаточно сильно связаны с режимами работы, внутренними процессами и вычленив их оттуда практически невозможно. В качестве примеров таких объектов можно привести вращающиеся печи для «мокрого способа» производства цемента, керамзитовые печи, печи металлургической промышленности, некоторые химические реакторы и так далее. Главной проблемой при создании модели и системы управления здесь будет огромное количество связей между технологическими величинами и параметрами объекта. При этом сами связи в основном являются нелинейными и нестационарными.

На данный момент уже достаточно сильно развиты методы и подходы искусственного интеллекта, которые могут помочь в создании управляющих алгоритмов. Так работают системы управления, например, для вращающихся печей «сухого способа» производства цемента. Но здесь необходимо учитывать, что принцип такого производства существенно отличается от указанного «мокрого способа», что не дает возможности применить подобные решения для него.

2.2. Постановка цели и задач. В качестве основной цели данного раздела публикации представляется описание подходов к созданию моделей и управляющих устройств, которые позволяют решить задачу управления работой объекта и моделирования динамики процесса в нем, а также позволяют выделить на общих алгоритмах места выхода из штатного функционирования с описанием путей возврата в него.

Здесь необходимо отметить, что стратегию создания алгоритмической модели технологического объекта и синтеза управляющего устройства, которая будет описана ниже, была выдвинута Валерием Залмановичем Магергутом исходя из его большого научного и практического опыта работы, а данный описываемый подход был разработан и защищен 26 июня 2013 года в кандидатской диссертации Бажанова А.Г. [5]. Создав научную школу по управлению на основе агентных подходов на кафедре технической кибернетики в БГТУ им. В.Г. Шухова, он проверял свои гипотезы на различных технологических объектах и дал возможность своим ученикам развивать свои идеи для более широкого спектра задач и применений.

Описываемые агентные подходы подразумевают наличие некоторого агента, который позволяет путем приема входящей информации и на основе собственных представлений о протекающем процессе выдавать некоторую реакцию, которая в данной статье представляет собой управляющие воздействия или моделируемые характеристики технологического процесса. Данная публикация посвящена разработке диаграмм поведения узлов, которые и являются агентами, позволяющими перерабатывать технологическую информацию.

Совокупность взаимосвязанных диаграмм поведения образует модель работы технологического объекта или процесса на основе текущих режимов для имеющихся технологических величин. Таким образом, мы можем получить систему, решающую задачу моделирования.

В монографии [6] рассмотрена суть работы диаграмм поведения узлов четкого типа, где технологические величины, параметры объекта и их взаимосвязи являются детерминированными и выраженными четкими логическими связями, а их режимы определяются дифференциальными уравнениями. Однако для того, чтобы описать взаимодействие в таком сложном объекте, как, например, цементная печь, таких описаний и функций недостаточно, к тому же для такого объекта отсутствует возможность описать режимы работы технологической величины с использованием дифференциальных уравнений. Поэтому было решено модернизировать подход, включив нечеткие соотношения как в описания режимов каждой технологической величины, так и в логические функции [7, 8].

Опишем принципы создания нечеткой диаграммы поведения узла при таком подходе для цементной вращающейся печи «мокрого способа» производства.

2.3. Описание объекта управления. Дадим краткое пояснение, почему был выбран именно данный технологический объект. Попытки решить задачу автоматизации цементной печи «мокрого способа» предпринимались, начиная с 1960-х годов [9], однако применение традиционных методов теории автоматического управления к разработке системы управления не привели к сколько-нибудь устойчивому регулированию. Это говорит о сложности цементной печи, как объекта автоматизации, что обусловлено нестационарностью и сложностью протекающих в ней физико-химических процессов, их многостадийностью, причем стадии распределены по длине печи, большим количеством внешних возмущений, взаимным влиянием технологических величин и параметров друг на друга и другими причинами. В подтверждение этого можно отметить, что и в России, где работает порядка 45 заводов, и, например, в США, где насчитывалось к 2008 году 48 цементных печей, работающих по «мокрому способу», нет известных автоматизированных систем управления процессом обжига [10]. В то же время, по прогнозам экспертов, использование печей такого способа будет осуществляться несколько десятков лет (см. рис. 2.1 и табл. 1). Именно поэтому разработка автоматизированных систем управления такими печами является актуальной. Кроме того, печь работает полностью в ручном режиме за исключением нескольких локальных контуров регулирования, не связанных напрямую с процессом обжига. Это означает, что качество процесса определяется опытом оператора и зачастую, как показывает опыт, оставляет желать лучшего. В процессе работы по этой же причине возникают неполадки, выходы в нештатные ситуации вплоть до останова печи или перевода ее на минимальных ход, что влечет потерю больших финансовых средств на восстановление.

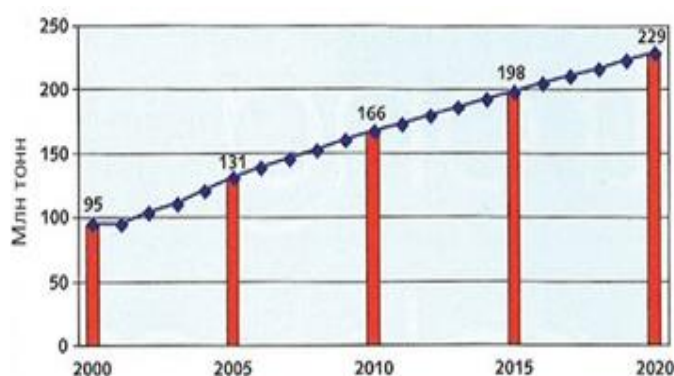


Рис. 2.1. Прогноз потребления цемента

Таблица 1 – Выпуск цемента по различным способам производства

Описание	2011	2012	2013	2014
Всего по энергосберегающим технологиям, тыс. тонн.	11741	15851	19691	26275
Всего мокрый способ, тыс. тонн.	44195	45662	46728	42149
Доля мокрого способа в общем производстве, %	79%	74%	70%	62%

Выходных технологических величин печи существенно больше управляющих воздействий, причем каналы управляющих воздействий по отношению к этим величинам характеризуются большой инерционностью и запаздыванием.

Нечеткость, которая характерна для процессов, протекающих в печи, делает нерациональным использование классических моделей статистики, базирующихся на уравнениях баланса, и динамики, базирующихся на дифференциальных уравнениях. В этих случаях целесообразно перейти на алгоритмические подходы с использованием нечетких систем. Построенные на их основе модели являются полезными и дают необходимую адекватность.

Объединение двух видов подходов: создание нечетких моделей и алгоритмических диаграмм поведения узлов дает ту степень возможности построения модели, после изучения и построения которой становится возможным создание систем управления и тренажеров, учитывающих возможные ситуации, которые могут произойти на данном объекте.

Главной отличительной особенностью данного подхода является симбиоз различных областей научного знания, связанных с изучением технологии процессов, использованием для описания работы аппарата нечетких множеств и созданием моделей в виде нечетких диаграмм поведения узлов.

2.4. Предлагаемая методика. Суть методики заключается в выполнении следующих основных этапов:

1 этап – «Построение схемы внешних связей аппарата».

Любой аппарат характеризуется множеством входных и выходных технологических величин [6]. Входные – разбиваются на четыре группы:

1) управляющие технологические величины;

- 2) возмущающие (контролируемые и неконтролируемые);
- 3) постоянные;
- 4) управляющие технологические координаты.

Кроме того, аппарат характеризуется стационарными и нестационарными параметрами.

Между рассмотренными величинами и параметрами имеют место внутренние связи, а выходные величины являются внешними факторами для иных величин других аппаратов, а в частном случае, для своего. Управляющие технологические воздействия – величины, которыми производится управление с помощью исполнительных устройств, управляющие технологические координаты – величины, являющиеся возмущениями, которым могут подвергнуться управляющие технологические величины и которые самостоятельно при выполнении определенных условий, названных технологическими, изменяют их без задействования исполнительных устройств. Возмущающие величины являются количественной характеристикой внешних и внутренних возмущений, которым подвержен аппарат.

Схема внешних связей аппарата с учетом всех внутренних величин и связей между ними и внешними величинами образует структурную технологическую схему аппарата.

2 этап – «Декомпозиция аппарата на узлы».

Все аппараты, которые в данном случае являются объектами управления, декомпозируются на узлы.

Узел – это часть технологической структурной схемы аппарата, которая соответствует конкретной выходной технологической величине и включает все воздействующие на эту величину входные величины аппарата, направленные связи между ними с учетом всех промежуточных величин и параметров.

Таким образом, на данном этапе вычленяется нужный узел (рис. 2.2) из общей структуры объекта со всеми воздействиями и технологическими условиями. Данный этап завершается формированием технологической структуры узла (рис. 2.3).

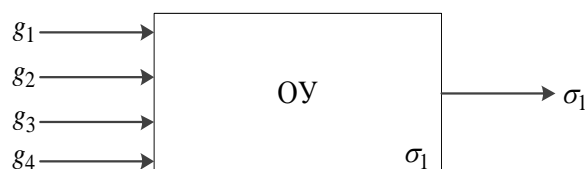


Рис. 2.2. Структура узла U_i

g_i – вектор входных управляющих технологических величин, σ_i – вектор выходных технологических величин

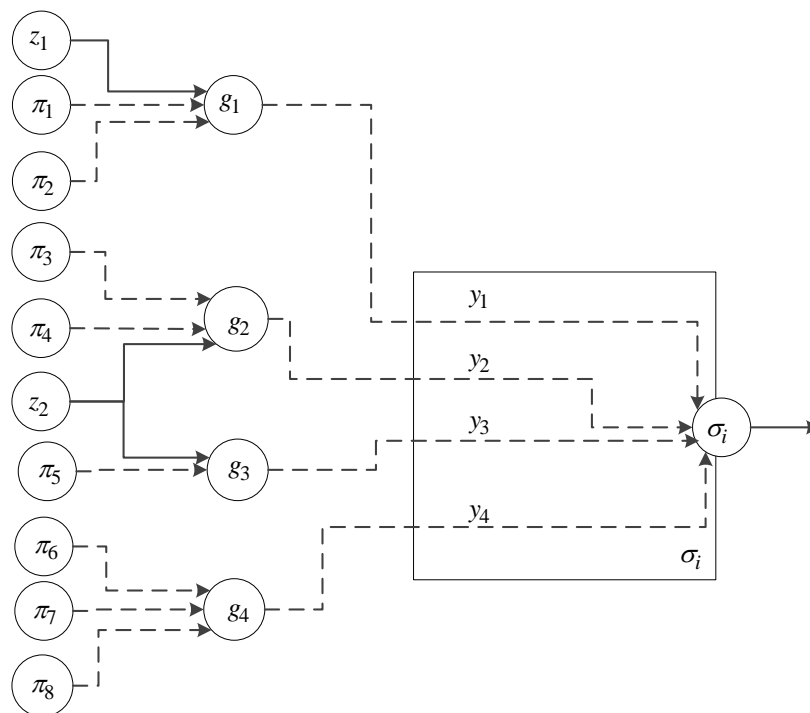


Рис. 2.3. Технологическая структура узла U_i

y_i – вектор входных возмущающих технологических величин, z_i – вектор управляющих воздействий, π_i – вектор управляющих технологических координат

Отметим, что первые два этапа ничем не отличаются от аналогичных этапов построения четких диаграмм поведения узлов.

3 этап – «Описание имеющихся технологических величин».

Каждый узел имеет входные и одну выходную величины. Для введения в модель их нужно описать математически. Детерминированный подход предполагал нахождение в изменениях выходной величины характерных точек, а затем, согласно этим точкам, составление уравнений динамики и статики для найденных интервалов из диапазона изменения выходной величины узла с нахождением их качественных решений в виде режимов. В предложенном подходе предлагается заменить эту процедуру процедурой с применением нечеткой логики. Прежде всего, на интервале изменения выходной технологической величины узла выделяются характерные стационарные области. Далее интервалы между областями и сами области описываются функциями принадлежности выходной величины узла к определенным выявленным термам. Аналогично поступаем и с входными величинами узла. На рис. 2.4 представлены примеры таких описаний.

4 этап – «Описание технологических условий (ТЛУ)».

После приведения величин узла к нечетким градациям и выявления его полной структуры необходимым элементом в создании модели является описание наступления ТЛУ для управляющих технологических координат. Для их описания используется скачкообразная функция с заданием булевого логического условия ее появления. Далее представлены примеры описания технологических условий.

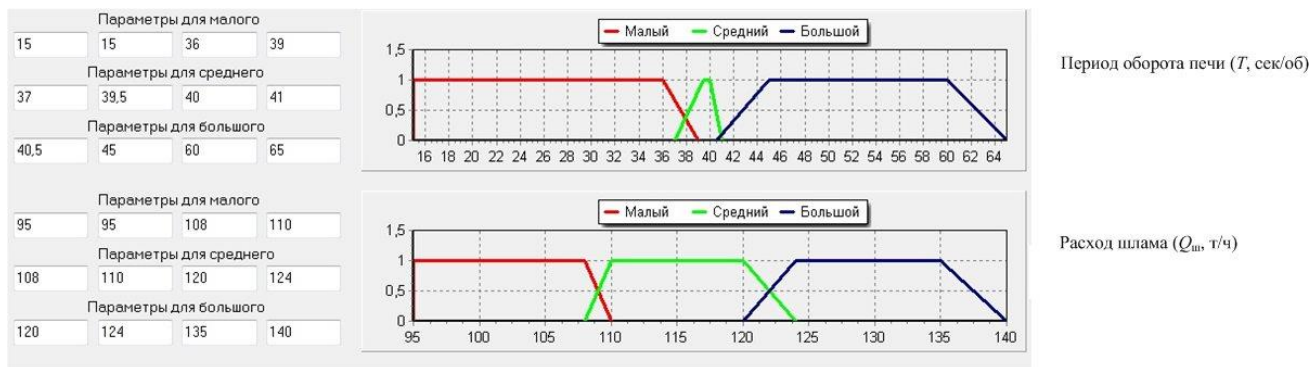


Рис. 2.4. Пример описание технологических величин на основе узла «Расход шлама»

$$g_1 = \begin{cases} 1 - \text{если привод печи исправен } (F_d), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases} \quad g_2 = \begin{cases} 1 - \text{корпус в рабочих пределах } (G_{кл}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$g_3 = \begin{cases} 1 - \text{если есть шлак } (F_{ш}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases} \quad g_4 = \begin{cases} 1 - \text{если клапан открыт } (R_k), \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases}$$

Технологические условия, наряду со знанием физико-химических закономерностей свойств веществ и явлений, выявляются также при подробном изучении технологии и способов управления объектом, а также при опросе специалистов-экспертов.

5 этап – «Построение нечеткой диаграммы поведения».

Для перехода от нечетких градаций к описанию в виде графа поведения необходимо мнемонически описать нечеткие режимы, которыми мы обозначим вершины нечеткой диаграммы с сохранением для нее общей формы (мнемоники) четкой диаграммы поведения и изменением содержательной части вершин и дуг. Под режимами выходной технологической величины узла понимается качественный закон ее движения на заданном интервале, в том числе для стационарных областей, с учетом знака изменения производных на интервалах. Для нечетких диаграмм поведения описание режимов производится нечеткими функциями. Число учитываемых производных определяет ранг режима.

Функции принадлежности, описывающие режимы, используются следующим образом: если функция является трапецевидной – статическим вершинам будут соответствовать интервалы со стопроцентной вероятностью, динамическим – в зависимости от направления, интервалы между соседними функциями; если функция треугольная или имеет место гауссово распределение, то статической будет вершина соответствующая диапазону 95–100 % вероятности, динамической – по аналогии с предыдущим за вычетом 5 %, занятых статической позицией. При этом крайняя левая и крайняя правая функция, соответственно, рассматриваются как S-образная и Z-образная функции, которые своими левой и правой сторонами принадлежат статической позиции. Пример отношений функций принадлежности с позициями нечеткой диаграммы поведения представлена на рис. 2.5.

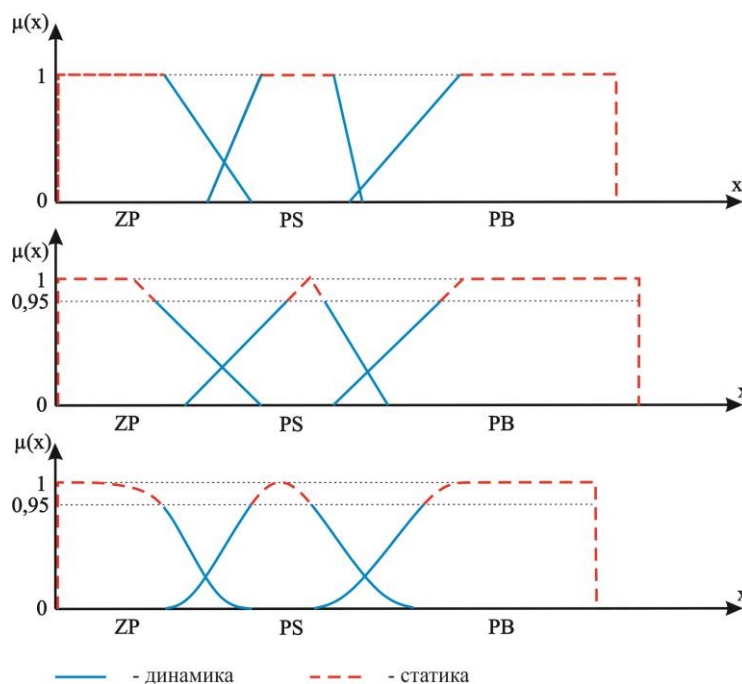


Рис. 2.5. Отношение функций принадлежности к позициям диаграммы

В динамических режимах происходят значительные изменения в контролируемом процессе, а в режимах статики (стационарных областях) – даже если изменения происходят, то они незначительны. На рис. 2.6 представлена диаграмма поведения узла второго ранга.

Режимом R_{ij} K -го ранга выходной величины σ_i называется пара $(\sigma_{ij}, \delta_i^k)$, определяющая закон движения σ_i на участке σ_{ij} из области изменения σ_{il} путем задания вектора K -го ранга $\delta^k = (S_1^k, \dots, S_i^k)$ изменения производных на этом участке, где S_i^k – характеристика производной K -го порядка величины σ_i как функции времени, принимающей три значения: $S_i^k = 0, S_i^k > 0, S_i^k < 0$.

Выделение в законе движения технологической величины режимов позволяет представить ее непрерывное во времени изменение в виде конечного набора режимов (рис. 2.7).

6 этап – «Описание пометок дуг».

На дугах записываются комбинационные и последовательностные логические функции, определяющие условия перехода от одного режима к другому. В качестве аргументов этих функций выступают управляющие воздействия (исполнительные устройства), технологические условия, внешние воздействия, определяющие поведение выходной технологической величины узла, и другое. На данном этапе производится интеграция знаний о переходах от режима к режиму, накопленных обслуживающим персоналом объекта, знаний технологов, теоретическими знаниями и исследованиями и прочее.

7 этап – «Составление разверток каждого из узлов».

Развертка узла представляет собой регламентное следование режимов (режим нормальной эксплуатации) печи для данного узла с учетом выходов в нештатные ситуации на основе (рис. 2.8). При этом для отображения работы такой развертки был выбран аппарат моделирования на основе помеченных

физических сетей Петри, которые позволяют увидеть параллельность при работе нескольких узлов, четко определить переходы по аналогии с диаграммой и выполнить анализ работы.

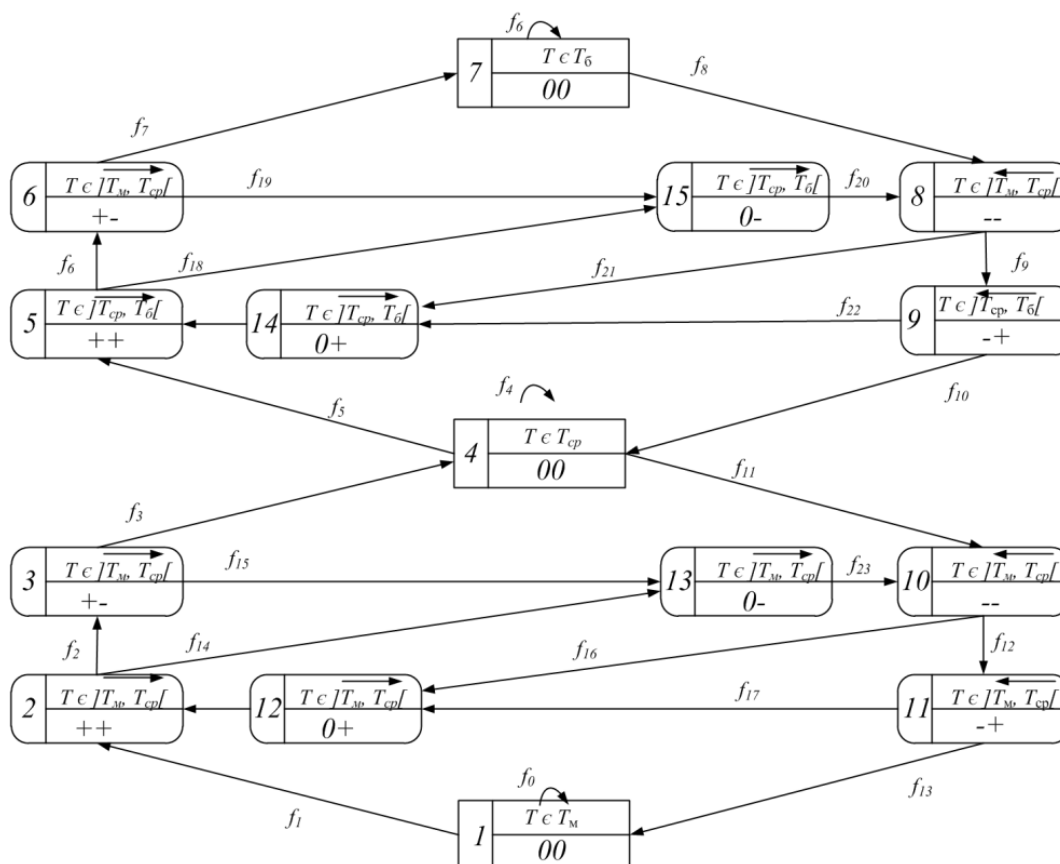


Рис. 2.6. Нечеткая диаграмма поведения узла второго ранга

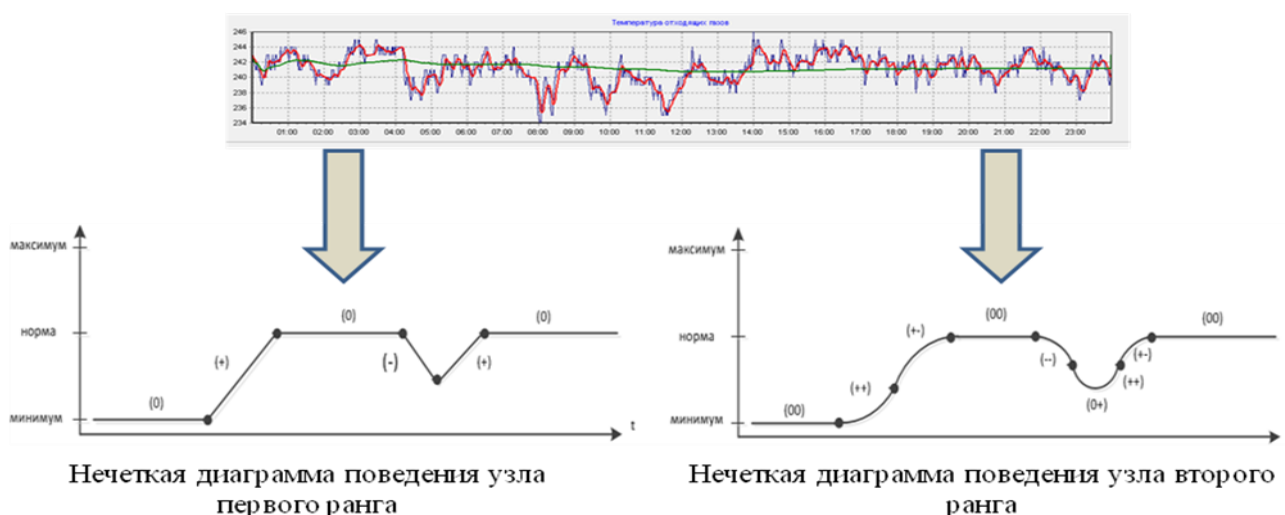


Рис. 2.7. Описание режимов технологической величины с учетом типов рангов

8 этап – «Совместное рассмотрение разверток узлов».

На данном этапе рассматривается совокупная работа узлов с выявлением их взаимодействия и нештатных и аварийных ситуаций с введением *TPT*-связей («переход-позиция-переход») между развертками узлов.

9 этап – «Программный синтез управляющего автомата».

Здесь по полученному алгоритму записываются продукционные правила, лежащие в основе советующей системы. При этом алгоритм управления отталкивается от имеющейся общей развертки технологического аппарата, так как, зная текущее расположение режимов по каждому из узлов на основе различных датчиков, мы можем выявить необходимое управление для работы в штатном режиме, а также составить необходимые блокировки для недопущения выхода в нештатные и аварийные ситуации.

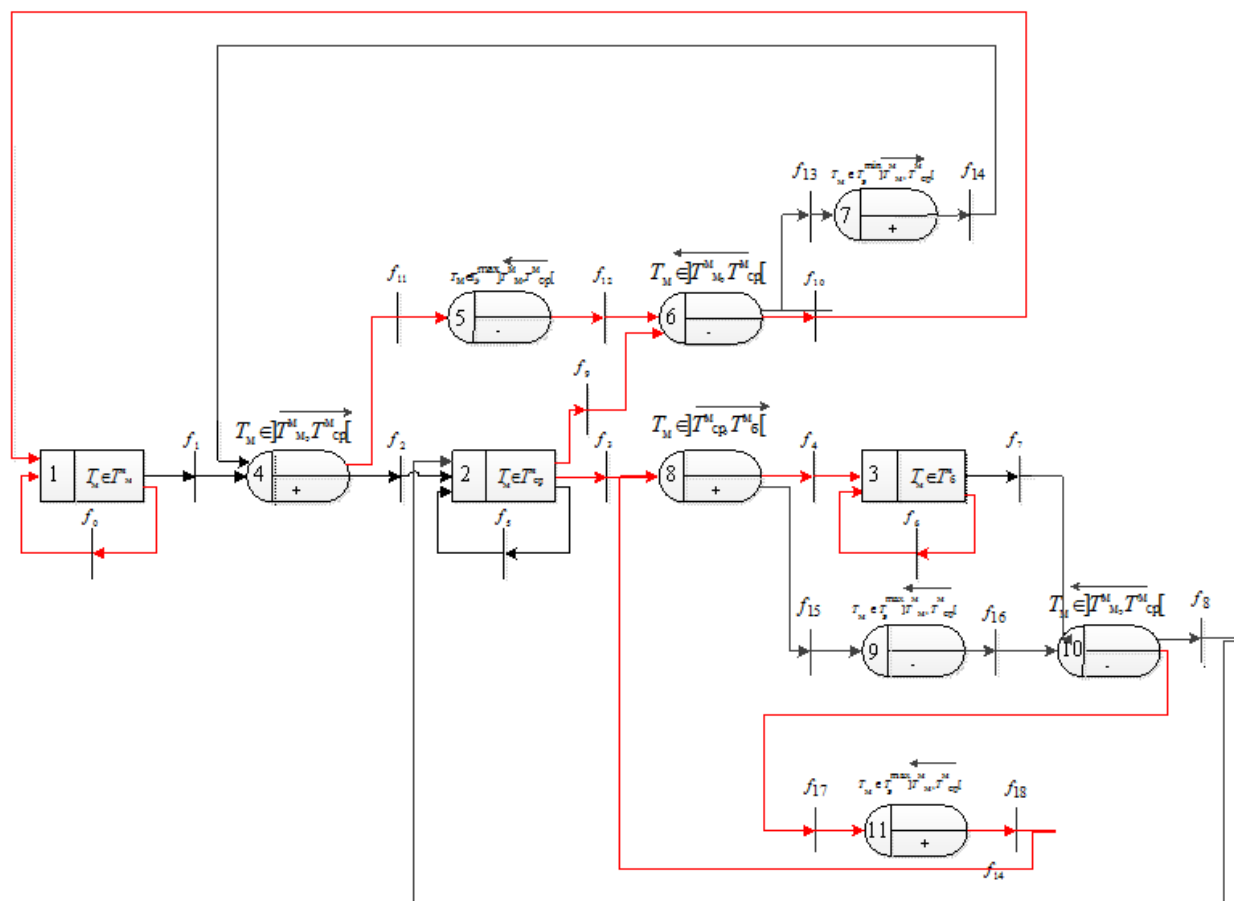


Рис. 2.8. Пример развертки узла
(красным выделены выходы в нештатную ситуацию)

2.5. Выводы. В данном разделе статьи описаны основные моменты, которые касаются разработки нечетких диаграмм поведения узлов для реализации модели объекта и последующего составления управляющего автомата для него. Однако данное направление исследований сейчас достаточно активно развивается. Так под руководством Магергута В.З. были начаты работы по интеграции в модели нейросетевых алгоритмов, которые позволяют на основе анализа промышленных баз данных для конкретного объекта выполнить идентификацию функций принадлежности по каждой из величин без участия человека, что снижает риск неверного восприятия инженером информации при автоматизации процесса.

Описаны методы, которые применялись ранее в попытках автоматизации вращающейся печи по «мокрому способу». Рассмотрены технические и программные средства, а также системы автоматизации на переделе обжига, используемые в настоящее время, в частности, на ЗАО «Осколцемент», относящиеся, как правило, к их использованию в локальных АСР, системах защиты и блокировок или информационных АСУ ТП. Сделан анализ методов интенсификации цементного производства и существующих моделей процесса обжига. Показана целесообразность перехода от классических подходов к автоматизации цементных печей, основанных на получении и исследовании дифференциальных уравнений, к алгоритмическим подходам [11, 12].

2.6. Развитие предлагаемого подхода. Еще одним направлением развития подхода нечетких диаграмм поведения является переход от классических продукционных правил к целеполагающим правилам, которые позволяют наиболее эффективно сформулировать управляющие условия и указывают на необходимое непосредственное движение по совокупности диаграмм поведения узлов объекта. Иными словами, вместо стандартных продукций вида «ЕСЛИ – ТО», Магергут В.З. предложил выполнить управление по конструкции «ЧТОБЫ – ПРИ – НУЖНО» [13]. Такая конструкция не меняет общих принципов формирования нечетких продукций, однако добавляет такие пункты как цель, описываемая в блоке «ЧТОБЫ», условия формирования правила в блоке «ПРИ» и непосредственно вывод о необходимом режиме по совокупности узлов в блоке «НУЖНО».

Показанные в данном разделе статьи подходы уже реализованы на ряде предприятий в виде программного продукта [14] для тестовой эксплуатации и сейчас проходят испытаний на реальных объектах. Такими объектами являются ЗАО «Осколцемент» (г. Ст. Оскол, Белгородская обл., Россия) и ОАО «Точик цемент» (г. Душанбе, Таджикистан).

3. Применение технического зрения в системе управления сложным технологическим объектом³

3.1. Актуальность. Агентоцентрическое моделирование сложных технологических систем с применением технического зрения проводилось Д.А. Юдиным под научным руководством В.З. Магергута. Диссертация по этой теме была защищена 22.05.14 [15]. В ней поднимается вопрос разработки и модернизации автоматизированной системы управления вращающейся печью с целью повышения стабильности работы печи и качества продукции, а также для улучшения условий труда операторов печей, повышения оперативности и качества принятия ими управляющих решений. Такие печи широко применяются в промышленности строительных материалов при производстве цемента, керамзита, извести, в цветной и черной металлургии.

³ Эта часть статьи написана Д.А. Юдиным по результатам его диссертационных исследований, выполненных под руководством проф. В.З. Магергута.

Обслуживающий персонал печей, как правило, осуществляет субъективное визуальное наблюдение параметров процесса обжига в зонах спекания и охлаждения печи и использует их в дальнейшем для принятия решения по управлению печью. Например, для вращающихся печей мокрого способа производства цемента операторами используются такие параметры, как гранулометрический состав клинкера на выходе печи, температура клинкера в зоне спекания, запыленность, тип факела, общее состояние зоны спекания, которые в настоящее время не вычисляются в автоматическом режиме. Для вращающихся цементных печей мокрого способа производства существующие системы не позволяют в автоматическом режиме определять эти параметры процесса обжига, и, тем более, формировать на их основе советы по управлению печью.

Первые работы по применению систем машинного зрения для оценки параметров процесса обжига по видеоизображению появляются в зарубежной литературе в начале 1990-х годов. Проведенный анализ более 100 источников научной литературы за последние 25 лет позволил сделать вывод об отсутствии эффективных методов анализа параметров процесса обжига во вращающихся цементных печах мокрого способа производства, а также о слабой проработке вопроса применения методов технического зрения в цементной отрасли для анализа изображений внутреннего пространства печи (см. рис. 3.1). Например, в работах [16-19] исследованы подходы распознавания изображений и управления вращающейся печью глинозема, в исследовании [20] рассмотрено распознавание изображений во вращающейся печи обжига необогащенной руды, в [21] – система управления вращающейся цементной печью сухого способа производства. Однако описанные в этих трудах решения не позволяют одновременно находить несколько важных визуальных параметров работы печи: оценки состояния зоны спекания, угла подъема, температуры и размера гранул клинкера на выходе печи, яркости факела и запыленности.

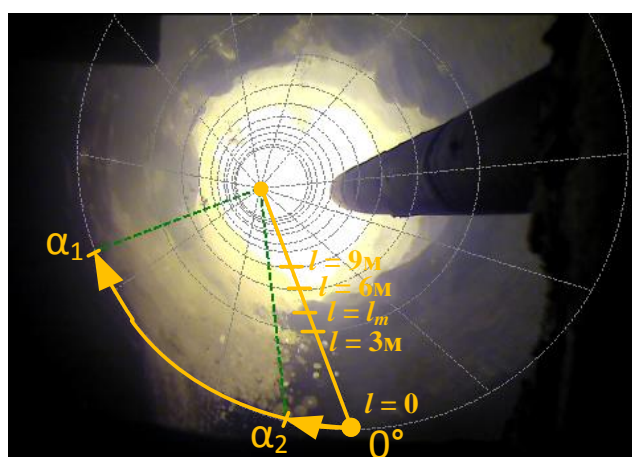


Рис. 3.1. Изображение внутреннего пространства печи обжига цементного клинкера: α_1 и α_2 – нижний и верхний угол подъема клинкера, l – расстояние до соответствующего поперечного сечения печи до «обреза» печи

В работах [5, 22] заложены основы создания интеллектуальной советующей системы управления вращающейся цементной печью мокрого способа производства цемента, структура которой содержит систему технического зрения для анализа изображений процесса обжига. Однако в них не формализовано использование найденных на изображениях процесса обжига параметров для управления печью, а также отсутствуют рекомендации по их определению.

Необходимо отметить научно-исследовательские и инженерные разработки ведущих компаний-производителей оборудования для цементной промышленности. Например, компьютерные симуляторы и тренажеры по управлению цементной вращающейся печью сухого способа производства цемента Simulex от компании KHD HumboldtCement и ECS/CEMulator от компании FLSmidth. Для вращающихся печей сухого способа производства цемента разработаны интегрированные системы управления немецкой компании Siemens [23], датской компании FLSmidth [24]. Швейцарская компания ABB [25] разработала интегрированную систему управления вращающимися печами Expert Optimizer, которая объединяет базовую систему правил управления с современными математическими методами нейронных сетей и нечеткого управления, а также с моделями управления с упреждением. Данные системы позволяют использовать информацию, получаемую от системы технического зрения, для мониторинга и управления печью, однако они не предназначены для вращающихся печей мокрого способа производства цемента, для которых комплексные интеллектуальные решения по автоматизированному визуальному распознаванию состояния процесса обжига практически отсутствуют.

Для автоматизации сбора визуальной информации о процессе обжига во вращающихся печах могут применяться системы промышленного телевидения российской компании ООО «Телесен» [26], которые, однако, не позволяют автоматически оценивать процесс обжига. Оценку температурного поля внутри цементной печи и прогноз содержания свободной извести в клинкере на основе изображений от специальной инфракрасной камеры обеспечивает система технического зрения компании DURAG [27], имеющая возможность интеграции с системой Expert Optimizer. Однако данная система не имеет возможности оценки ключевых параметров процесса обжига во вращающейся цементной печи, таких как грануляция, высота подъема материала в печи и оценка состояния зоны спекания, кроме того не на всех цементных производствах технология производства цемента предполагает наличие в клинкере свободной извести. Эти факты, а также высокая стоимость и сильные погрешности измерения температур из-за пыли, требуют создания более надежных и дешевых систем.

3.2. Структура системы управления вращающейся печью с техническим зрением. С учетом недостатков существующих систем для решения задачи мониторинга и управления вращающейся цементной печью по мокрому способу Д.А. Юдин и В.З. Магергут разработали систему управления,

основанную на трех взаимодействующих агентах: агенте технического зрения, агенте нечеткого вывода и агенте-операторе (см. рис. 3.2).

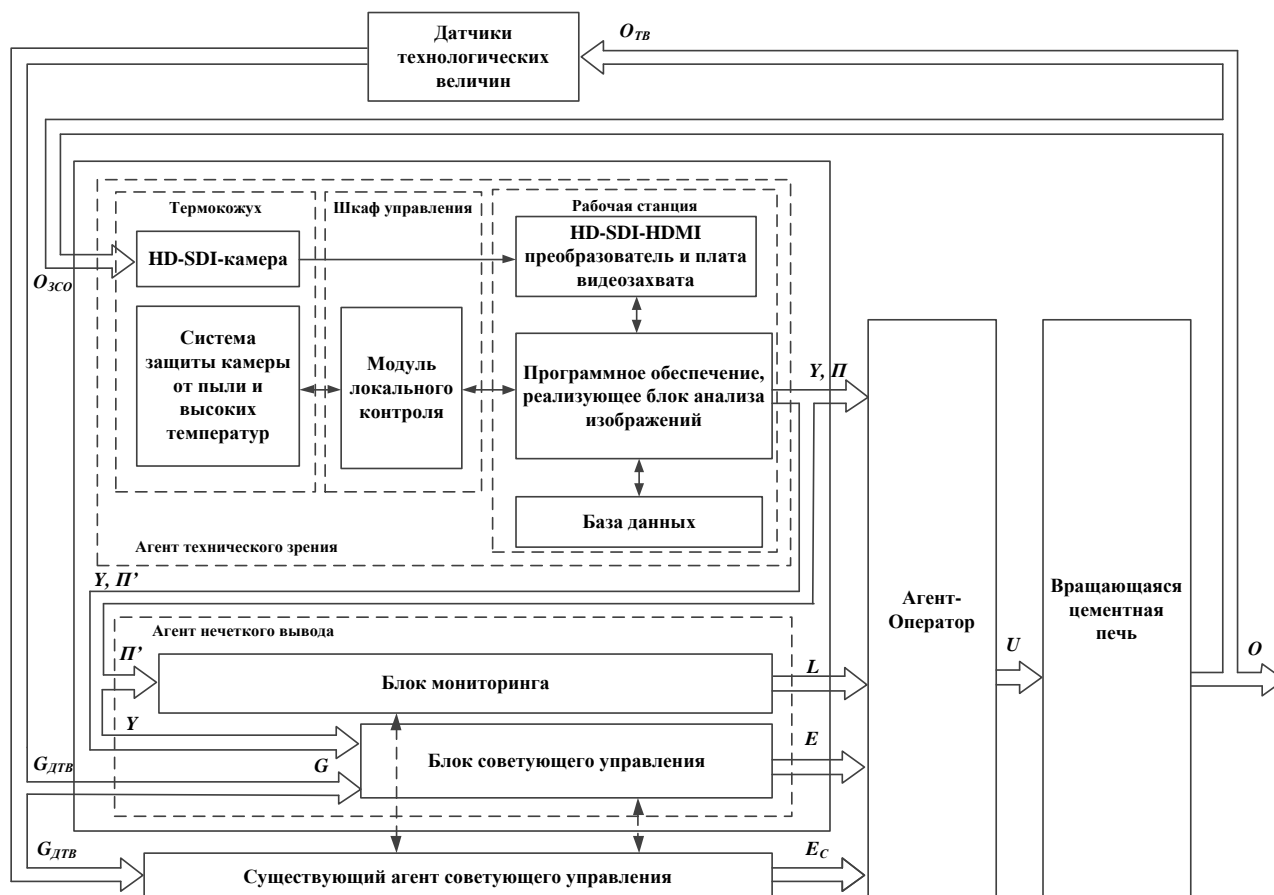


Рис. 3.2. Структура системы управления вращающимися печами с техническим зрением, основанной на трех агентах

На вход агента технического зрения поступает визуальная информация о состоянии зоны спекания и охлаждения печи $O_{зсо}$, которая преобразовывается HD-SDI-видеокамерой в последовательность изображений. На выходе агент технического зрения вырабатывает вектор 12 информативных признаков изображения Π и оценку состояния зоны спекания вращающейся печи Y . Аппаратный комплекс этого агента состоит из 3-х основных элементов: термокожуха, шкафа управления и рабочей станции и позволяет защищать видеокамеру от высоких температур (до 300 °C) и пыли. Программное обеспечение подсистемы технического зрения реализует метод оценки параметров процесса обжига на основе анализа изображений, описанный в [15].

Разработанный агент нечеткого вывода включает в себя блок мониторинга, осуществляющий преобразование численных значений информативных признаков $\Pi' = [\Pi^{(1)}, \Pi^{(3)}, \Pi^{(6)}, \Pi^{(7)}, \Pi^{(10)}]$ в качественные значения пяти оценок процесса обжига $L = [L_1, L_2, L_3, L_4, L_5]$: угла подъема клинкера L_1 ; температуры клинкера L_2 ; размера гранул клинкера L_3 ; яркости факела L_4 ; запыленности L_5 ; а также блок советующего управления, построенный на основе базы из 72 правил. Входным вектором блока советующего управления является вектор G , который содержит три

составляющие: оценку состояния зоны спекания вращающейся печи Y , полученную агентом технического зрения, а также составляющие вектора $G_{ДТВ}$ – период одного оборота печи $T_{об}$, и относительное изменение температуры отходящих газов $D_{Тог}$. Выходным вектором блока мониторинга является вектор E , имеющий шесть составляющих – советов по управлению печью – относительное изменение расхода топлива D_{Qt} , изменение режима вращения печи $D_{Тоб}$, расход подаваемого в печь шлама $Q_{ш}$, изменение величины открытия шиберов вентилятора общего дутья $\Delta Z_{од}$, изменение разрежения отходящих газов в пылесадительной камере $\Delta P_{нк}$, режим подачи управляющего воздействия (расхода топлива и расхода шлама) M_C [15].

Разработанный агент нечеткого вывода дополняет существующий агент советующего управления для вращающейся печи [5], принимающий на вход информацию от датчиков технологических величин $G_{ДТВ}$ и дающий на выходе советы по управлению вращающейся печью E_C . Дополнение осуществляется как в плане новых используемых входных и выходных переменных, так и в плане базы продукционных правил, основанной на полученной оценке состояния зоны спекания вращающейся печи.

Вектор информативных признаков Π , оценка состояния зоны спекания печи Y , формируемые агентом технического зрения, вектор оценок параметров процесса обжига L и вектор советов по управлению печью E , вычисляемые в разработанном агенте нечеткого вывода, поступают агенту-оператору вращающейся печи, который задает управляющие воздействия (вектор U) на вращающуюся цементную печь, имеющей вектор состояния O .

Рассмотрим подробнее механизмы функционирования указанных агентов.

3.3. Агент технического зрения. В опубликованных авторами работах [15, 28-30] предложен метод качественной оценки состояния зоны спекания вращающейся печи Y , которая имеет 6 значений, соответствующих категориям: «сильно ослаблена (брак)» ($Y=0$), «ослаблена» ($Y=1$), «несколько ослаблена» ($Y=2$), «в норме» ($Y=3$), «немного перегрета» ($Y=4$), «сильно перегрета» ($Y=5$). Для оценки этих состояний зоны спекания применен метод экстремального обучения нейронной сети [30], который позволяет по вычисленному вектору информативных признаков Π с точностью $96,7 \pm 1,9\%$ на обучающей и $94,1 \pm 9,9\%$ на тестовой выборках найти оценку состояния зоны спекания во вращающейся печи (см. рис. 3.3).

Предложенный классификатор, построенный на основе метода экстремального обучения [30] показал свое преимущество перед другими классификаторами: радиально-базисной нейронной сетью, методом опорных векторов, трехслойной нейронной сетью с одним скрытым слоем, обучаемой методом обратного распространения ошибки. Обучение классификатора производилось на основе выборки из 50 изображений, тестирование на основе 3-х выборок по 17 изображений. Вектор информативных признаков Π вычислялся на основе распознавания изображения процесса обжига, для чего был разработан алгоритм сегментации изображения методом SOM с классификацией по эталону (для нахождения сегментов «факел», «материал»,

«футеровка», «корпус и горелка печи» [29] и предложен подход к построению на изображении процесса обжига вспомогательной сетки, которая показывает поперечные сечения по длине печи.

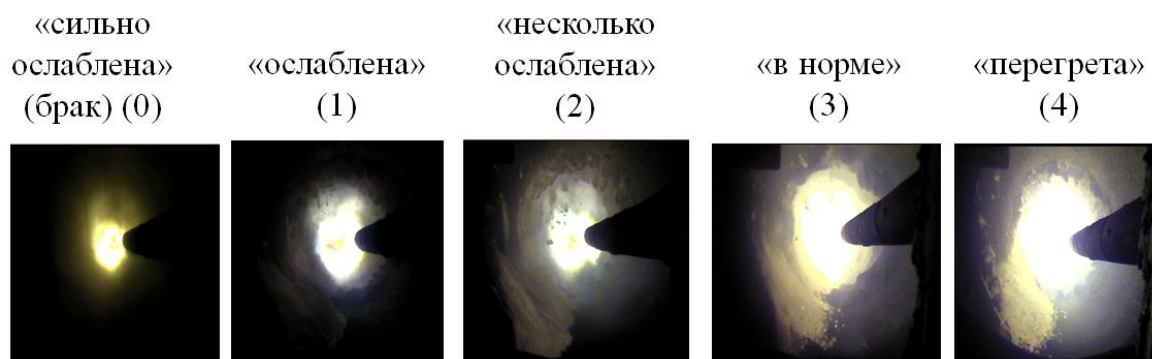


Рис. 3.3. Результат оценки состояния зоны спекания
вращающейся цементной печи
по изображениям процесса обжига

Изображение, получаемое с видеокамеры, является цветным и имеет размер 1920×1080 пикселей. Для дальнейшей обработки используется его информативная часть, представленная в оттенках серого с помощью цветовой модели YUV и имеющая размер 1200×900 пикселей, которая масштабируется с помощью операции усреднения яркости до размера 480×340 и разбивается на области размером 10×10 пикселей, что обеспечивает достаточное быстродействие при приемлемом качестве работы алгоритмов сегментации и классификации изображения процесса обжига, где не так значимы мелкие детали.

Алгоритм сегментации изображения процесса обжига позволяет со средней точностью $73 \pm 7,12\%$ находить 4 типа областей: факел, материал, футеровка, горелка и корпус печи. Он построен на основе самоорганизующихся карт (SOM – Self-Organizing Map) Кохонена с классификацией по эталону и включает в себя предварительную оптимизацию набора текстурных характеристик с помощью генетического алгоритма [31]. При этом вычисленная матрица текстурных характеристик (автокорреляция, однородность, интенсивность, вариация) поступает на вход самоорганизующейся карты Кохонена, содержащей 64 нейрона. Пример сегментации изображения процесса обжига с помощью предлагаемого метода, приведена на рис. 3.4.

Агент технического зрения на найденных сегментах вычисляет вектор информативных признаков, который имеет двенадцать составляющих $\mathbf{P} = [P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(12)}]$: углы верхней и нижней границы сегмента «материал»; средняя, минимальная и максимальная яркости пикселей в области материала в печи, косвенно характеризующие качественное значение его температуры; признак размера гранул клинкера; среднеквадратическое отклонение яркости пикселей всего изображения от средней яркости; эквивалентный диаметр сегмента «факел», средняя яркость всего изображения, величины

среднеквадратического отклонения гистограммы яркости пикселей сегментов факела, материала и футеровки от среднего значения.

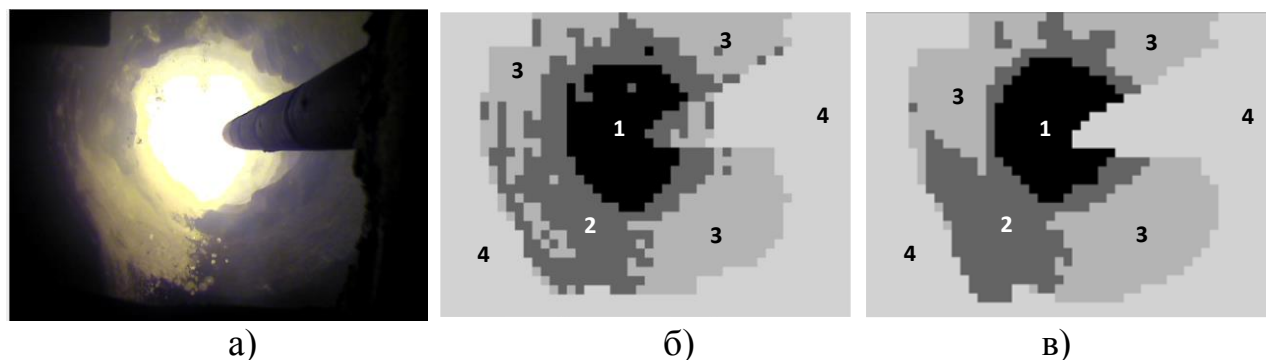


Рис. 3.4. Результат сегментации изображения процесса обжига методом SOM с классификацией по эталону: а) исходное изображение, б) сегментация (1 – факел, 2 – материал, 3 – футеровка, 4 – корпус и горелка), в) эталон.

Время работы метода (около 360 мс) удовлетворяет требованию по распознаванию изображений процесса обжига в зонах спекания и охлаждения вращающейся цементной печи в режиме реального времени с выделением оценки состояния зоны спекания и информативных признаков на изображении.

3.4. Агент нечеткого вывода. Нечеткие термы информативных признаков блока мониторинга агента нечеткого вывода найдены методом построения функций принадлежности лингвистических термов на основании статистических данных (рис. 3.5), при этом использовалось 101 изображение процесса обжига.

При заданных значениях вектора информативных признаков $\mathbf{P}' = [P^{(1)}, P^{(3)}, P^{(6)}, P^{(7)}, P^{(10)}]$, для каждого из этих признаков вычисляются значения функций принадлежности нечетких термов L_{ij} , $i = 1, 2, \dots, 5$. Среди них находится терм L_{ij} с наибольшей величиной функции принадлежности, соответствующее ему значение L_i и будет являться качественной оценкой i -го параметра процесса обжига.

Например, если для исследуемого изображения процесса обжига признак $P^{(1)}$ (угол верхней границы сегмента «материал» α_1) принял значение 74,625 градуса, то значения функций принадлежности оценки угла подъема составляют: $L_{13} = 0,91$ – для терма «норма», $L_{14} = 0,20$ – для терма «больше нормы», $L_{12} = 0,04$ – для терма «меньше нормы» и $L_{11} = 0$ – для терма «существенно меньше нормы» (для рассмотренного примера суммы значений всех функций принадлежности не равны единице, это вызвано особенностями рассмотренного набора экспериментальных данных). Таким образом, значение качественной оценки параметра «Угол подъема клинкера» будет составлять $L_1 = 2$ («норма»).

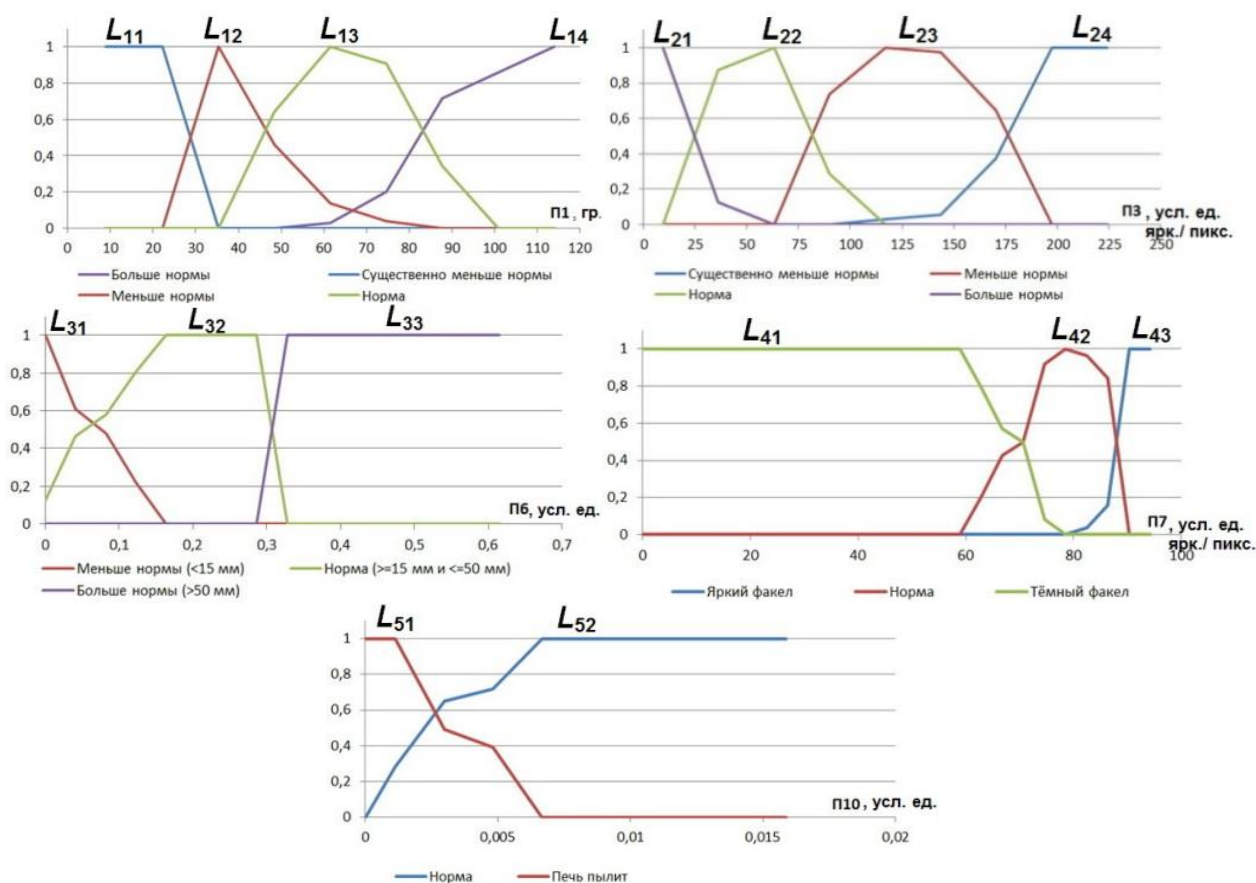


Рис. 3.5. Полученные функции принадлежности информативных признаков изображения

На основании трудов по теоретическим основам и практическим приложениям нечеткой логики В.И. Гостева, М.И. Дли, В.В. Круглова, А.В. Леоненкова, С.Д. Штовба, Л. Заде, А. Пегата и др., а также формализации опыта операторов вращающихся печей ЗАО «Осколцемент» (г. Старый Оскол) разработан нечеткий блок советующего управления, содержащий базу правил, построенную на основе оценки состояния зоны спекания [32]. Он реализует управление вращающейся цементной печью мокрого способа производства, выведенной на регламентный (нормальный) режим работы.

При этом рассмотрены отклонения от нормы трех входных лингвистических переменных, образующих входной вектор $G = [Y, T_{об}, D_{Тог}]$: оценки состояния зоны спекания Y (усл. ед.), полученной агентом технического зрения, периода одного оборота печи $T_{об}$ (с/об), относительного изменения температуры отходящих газов $D_{Тог}$ (%).

Выходные лингвистические переменные блока советующего управления записываются в виде вектора $E = [D_{Qm}, D_{Тоб}, Q_{ш}, D_{Zод}, D_{Pнк}, M_C]$, элементы которого представляют собой советы агенту-оператору по управлению печью: D_{Qm} – относительное изменение расхода топлива (%); $D_{Тоб}$ – изменение режима вращения печи (усл. ед.); $Q_{ш}$ – расход подаваемого в печь шлама (сырья) (м³/час); $\Delta Z_{од}$ – изменение величины открытия шиберы вентилятора общего дутья (%); $\Delta P_{нк}$ – изменение разрежения отходящих газов в пылеосадительной камере (мм. вод. ст.), M_C – режим подачи (ступенчатый или импульсный)

управляющего воздействия (изменения расхода топлива и расхода шлама) (усл. ед.).

В качестве метода нечеткого вывода при работе с базой правил советующего управления применен алгоритм нечеткого вывода Мамдани, вид функций принадлежности нечетких лингвистических переменных принят в виде трапеций (в частном случае, треугольников). Такой выбор эффективен с точки зрения простоты и быстродействия при работе в составе системы автоматизированной советующей системы управления, функционирующей в реальном времени.

Для базы советующего управления совместно с операторами печей ЗАО «Осколцемент» составлены 72 производственных правила управления печью с применением оценки состояния зоны спекания.

База правил представляет собой множество правил нечетких производств, каждое i -е правило ($i = 1, 2, \dots, 72$) в общем виде выражено следующим образом:

ЕСЛИ $G_1 = a_{1i}$ И $G_2 = a_{2i}$ И ... И $G_m = a_{mi}$,
ТО $E_1 = d_{1i}$ И $E_2 = d_{2i}$ И ... И $E_l = d_{li}$.

Здесь $m = 3$ – количество подусловий в правиле, $l = 6$ – количество заключений, a_{ji} – терм j -й входной нечеткой переменной для i -го правила, d_{ji} – терм j -й выходной нечеткой переменной для i -го правила. Все правила объединены операциями логического «ИЛИ» с единичными весовыми коэффициентами.

Приведем пример одного из правил советующего управления:

ЕСЛИ $Y = \text{NB}$ И $T_{об} = Z$ И $D_{Тог} = Z$,
ТО $D_{Qm} = \text{NM}$ И $D_{Тоб} = \text{PB}$ И $Q_{ш} = \text{NB}$ И $\Delta Z_{од} = \text{NB}$ И $\Delta P_{нк} = \text{NB}$ И $M_C = Z$.

Оно может быть интерпретировано на естественном языке следующим образом: Если оценка состояния зоны спекания Y – «сильно ослаблена (брак)» (NB – Negative Big) и период одного оборота печи $T_{об}$ – «норма (полный ход)» (Z – Zero) и относительное изменение температуры отходящих газов $D_{Тог}$ – «нет изменений (норма)» (Z), то относительное изменение расхода топлива D_{Qm} – «сильное уменьшение» (NM – Negative Medium) и изменение режима вращения печи $D_{Тоб}$ – «установить период оборота печи намного больше нормы (тихий ход)» (PB – Positive Big) и расход шлама $Q_{ш}$ – «установить намного меньше нормы» (NB) и изменение величины открытия шиберов вентилятора общего дутья $\Delta Z_{од}$ – «сильное уменьшение» (NB) и изменение разрежения отходящих газов в пылесадительной камере $\Delta P_{нк}$ – «сильное уменьшение» (NB) и режим подачи управляющего воздействия (расхода топлива и шлама) M_C – «ступенчатое» (Z).

3.5. Программно-аппаратная реализация системы. Описанную структуру многоагентной системы управления реализует разработанный программно-аппаратный комплекс, основные компоненты которого показаны на рис. 3.6.

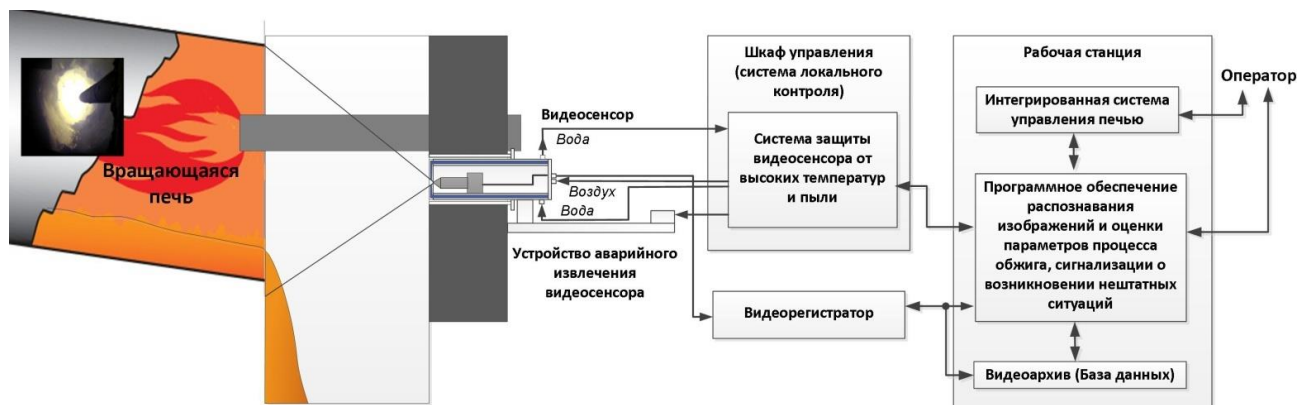


Рис. 3.6. Программно-аппаратный комплекс, реализующий структуру многоагентной системы управления вращающейся печью с техническим зрением

Анализ работы аппаратного комплекса (рис. 3.7а) показал эффективность его применения в промышленных условиях: при температуре в месте установки свыше $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высокой запыленности. Температура видеокамеры в процессе работы кожуха не превышает $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$; обеспечен захват изображения процесса обжига высокого качества с разрешением 1920×1080 с частотой кадров $1/25\text{ с}$.

Разработан программный комплекс, реализующий функциональность агента технического зрения (программы для ЭВМ №2013618121 и №2012617408). С применением локальной базы данных осуществлена программная реализация модуля оператора (рис. 3.7б), модуля настройки алгоритма распознавания изображений, модуля работы с архивом, модуля настроек программы.

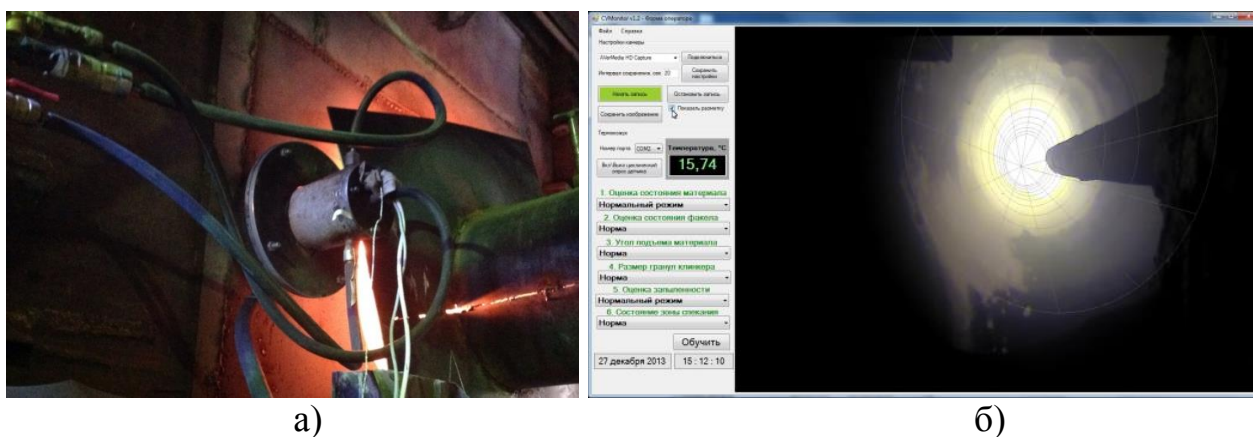


Рис. 3.7. Программно-аппаратный комплекс системы мониторинга и оперативного управления вращающимися печами на основе технического зрения: а) термокожух с жидкостным и воздушным охлаждением для защиты видеокамеры; б) экранная форма модуля оператора

Результаты испытаний программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы на вращающейся печи № 1 ЗАО «Осколцемент» показали его пригодность для работы в реальном масштабе времени.

Применение разработанной трехагентной системы устраняет необходимость для оператора осуществлять непосредственное визуальное наблюдение за процессом обжига в печи во вредных для организма человека

условиях окружающей среды, что улучшает условия труда, снижает нагрузку на оператора, повышает оперативность принятия управляющих решений в среднем на 12% [15], повышает качество принятия оператором управляющих решений.

3.6. Выводы. Найденные оценки параметров процесса обжига и структура автоматизированной многоагентной системы управления с применением технического зрения могут быть применены в системах управления вращающимися печами в различных отраслях промышленности: при производстве керамзита, извести, в цветной металлургии и др., в том числе, существующих.

Предложенная база правил советующего управления затрагивает применение только трех параметров работы печи для принятия управляющего решения: оценки состояния зоны спекания Y , получаемой на основе анализа изображений процесса обжига, периода одного оборота печи $T_{об}$ и относительного изменения температуры отходящих газов $D_{Тог}$. С одной стороны, она охватывает лишь часть режимов работы печи и требует расширения и дополнения, а с другой стороны, разработанная база правил сама по себе может быть встроена в систему советующего управления всей печью.

4. Формализация и анализ дискретных организационно-технологических систем со структурированными агентами на индикаторных сетях⁴

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук с такой темой [33] была подготовлена аспирантом кафедры технической кибернетики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова – А.В. Чуевым, под научным руководством В.З. Магергута, и защищена 8 июня 2016 года, уже после ухода из жизни Валерия Залмановича. В данном разделе статьи представлены основные результаты этого диссертационного исследования.

4.1. Актуальность. В настоящее время при автоматизации технологических процессов и управлении организационными системами достаточно часто стали применяться дискретные технологии. С одной стороны, это связано с развитием компьютерной техники, а с другой – со сложностями или, в некоторых случаях, невозможностью использования аналоговых технологий. Одним из перспективных направлений создания дискретных организационно-технологических систем (ОТС), в том числе их устройств управления, являются интеллектуальные системы, в которых широко применяются сетевые технологии. Перспективным является создание дискретных ОТС на основе сетей, образующих структурированные интеллектуальные агенты. Однако при создании «агентоцентрических» систем

⁴ Эта часть статьи написана А.В. Чуевым по результатам его диссертационных исследований, выполненных под руководством проф. В.З. Магергута.

возникает ряд трудностей, связанных с формированием структуры и поведения агентов. Поэтому многие работы по подобной тематике имеют в основном описательный характер. Следовательно, развитие формализованных технологий построения и анализа агентоцентрических ОТС на основе моделей, базирующихся на сетях разного типа, является актуальной задачей с точки зрения практического применения идей агентного моделирования. Такие технологии позволяют создать более качественные системы, ориентированные на учет конкретных особенностей создаваемого проекта.

Таким образом, технологии, основанные на интеллектуальных агентах и сетях, являются формальным аппаратом построения и анализа дискретных ОТС различного назначения, в том числе технических и технологических, административных и социальных, систем массового обслуживания и др. Такие модели могут быть использованы при автоматизации технологических процессов в части их моделирования и построения устройств управления, а также для анализа систем массового обслуживания в части рационализации прохождения агентов-заявок через систему и распределения нагрузки между агентами обеспечения. В связи с этим актуальна задача развития аппарата агентоцентрических систем и построения на его основе новых методов формализации дискретных ОТС.

Поскольку вопросы агентного моделирования относятся к области искусственного интеллекта (ИИ), сделаем небольшой обзор по этой тематике. Вклад в становление ИИ внесли многие из отечественных и зарубежных ученых: М.М. Бонгард, М.А. Гаврилов, Д.А. Поспелов, М.Л. Цетлин, У. МакКаллок, Дж. Маккарти, М. Минский, Ф. Розенблатт, А. Тьюринг и др. Исследованиями в области многоагентных систем (МАС) – одного из направлений ИИ, занимались В.Н. Бурков, Ю.А. Ивашкин, В.Л. Конюх, Д.А. Новиков, В.Б. Тарасов, А.К. Тугенгольд, С.А. Юдицкий, Е.И. Юревич, К. Сикара, И. Шоэм и др.

В основу работы помимо агентного подхода положено использование и сетевых технологий. Одним из сетевых инструментариев для моделирования дискретных процессов является аппарат сетей Петри и его модификаций. Большой вклад в развитие сетей Петри внесли О.Л. Бандман, В.Е. Котов, С.А. Юдицкий, Дж. Денис, К. Петри, Дж. Питерсон, Д. Табак, М. Хэк, А. Хольт и др.

Приведем наиболее общее определение агента. **Агентом** является все, что может рассматриваться как воспринимающее свою среду с помощью датчиков и воздействующее на эту среду с помощью исполнительных механизмов (рис. 4.1) [34].

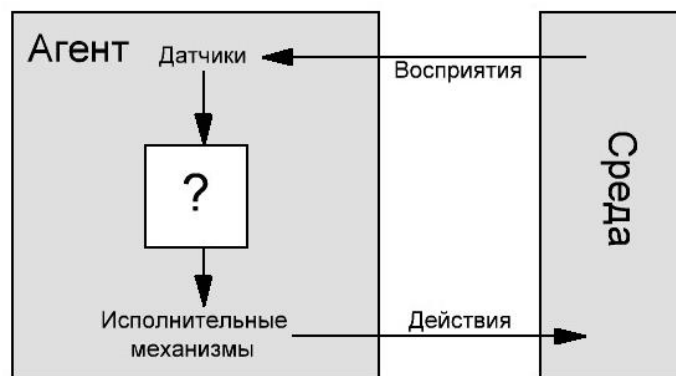


Рис. 4.1. Структура взаимодействия агента со средой

4.2. Моделирование систем на основе индикаторных сетей. Сочетание приведенных подходов, как будет показано далее, использовано автором при моделировании систем и процессов различной природы.

Итак, рассмотрим понятие индикаторной сети. *Индикаторная сеть* [35] – это набор $IS = \langle G, F, \beta, \pi_1, \pi_2 \rangle$, где G – двудольный граф, $F = \{F_i, i=1, \dots, e\}$ – множество индикаторных выражений, $\beta: T \rightarrow F$ – функция, задающая пометку переходов графа дополнительными условиями, заданными экспертом, $\pi_1: P \times T \rightarrow N$, $\pi_2: T \times P \rightarrow N$ – функции «взвешивания» числами натурального ряда соответственно входных и выходных дуг переходов, $N = \{2, 3, \dots, n\}$. Если дуга графа не помечена, то по-умолчанию ее вес равен 1; если не помечен переход, то дополнительное условие для него отсутствует.

Динамика индикаторной сети отображается *лентой поведения*, которая строится с учетом ограничений на порядок срабатывания переходов двудольного графа (например, в момент времени τ может сработать не более одного перехода, и для любого перехода известно подмножество переходов, которые могут сработать в следующий момент $\tau+1$).

Индикаторной сетью можно промоделировать любую дискретную систему, а также представить типовые фрагменты ряда известных расширений сетей Петри [35].

Под бинарной индикаторной сетью (БИС) и бинарным структурированным агентом будем понимать совокупность двух взаимодействующих индикаторных сетей – подагентов (PA), именуемых графом целей и графом действий:

$$BIS = \{PA_c, PA_d\}.$$

Пример графового описания БИС дан на рис. 4.2 (сверху – граф целей, снизу – граф действий). Срабатывание перехода q_i на графе целей, а также t_j на графе действий зависит от количества маркеров в его входных позициях, весов его входных дуг, а также дополнительных условий, помечающих переход: внешних условий v_k , оценок состояния системы s_n , ресурсов r_m , воздействий на среду w_p .

Графовую форму представления можно преобразовать в алгебраическое описание БИС в виде набора индикаторных выражений, моделирующих переходы (алгебраическое описание эффективно для внутреннего представления в компьютере сложных БИС).

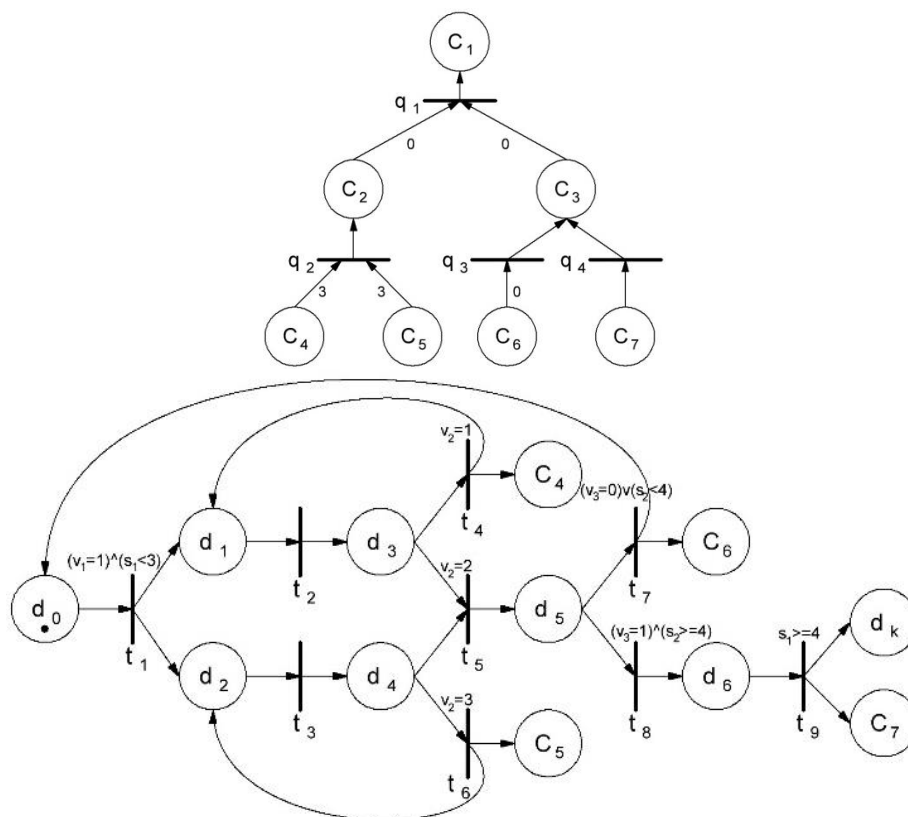


Рис. 4.2. Пример бинарной индикаторной сети

Приведем набор индикаторных выражений для БИС, представленной на рис. 4.2.

Для графа целей:

$$F(q_1): (C_2(\tau)=1) \wedge (C_3(\tau)=1) \rightarrow (C_1(\tau+1)=C_1(\tau)+1);$$

$$F(q_2): (C_4(\tau)=3) \wedge (C_5(\tau)=3) \rightarrow (C_4(\tau+1)=0) \wedge (C_5(\tau+1)=0) \wedge (C_2(\tau+1)=1);$$

$$F(q_3): (C_6(\tau)=1) \rightarrow (C_3(\tau+1)=C_3(\tau)+1);$$

$$F(q_4): (C_7(\tau)=1) \rightarrow (C_3(\tau+1)=C_3(\tau)+1) \wedge (C_7(\tau+1)=0).$$

Для графа действий:

$$F(t_1): (v_1(\tau)=1) \wedge (s_1(\tau)<3) \wedge (r_1(\tau)\geq 4) \wedge (r_2(\tau)\geq 4) \wedge (d_0(\tau)=1) \rightarrow (d_0(\tau+1)=0) \wedge (d_1(\tau+1)=1) \wedge (d_2(\tau+1)=1) \wedge (r_1(\tau+1)=r_1(\tau)-0,2) \wedge (r_2(\tau+1)=r_2(\tau)-0,2);$$

$$F(t_2): (r_3(\tau)\geq 4) \wedge (d_1(\tau)=1) \wedge (\tau>1) \wedge (\tau<4) \rightarrow (d_1(\tau+1)=0) \wedge (d_3(\tau+1)=1) \wedge (r_3(\tau+1)=r_3(\tau)-0,1);$$

$$F(t_3): (r_4(\tau)\geq 4) \wedge (d_2(\tau)=1) \wedge (\tau>1) \wedge (\tau<4) \rightarrow (d_2(\tau+1)=0) \wedge (d_4(\tau+1)=1) \wedge (r_4(\tau+1)=r_4(\tau)-0,2);$$

$$F(t_4): (v_2(\tau)=1) \wedge (d_3(\tau)=1) \wedge (r_3(\tau)>3) \rightarrow (d_1(\tau+1)=1) \wedge (C_4(\tau+1)=C_4(\tau)+1) \wedge (d_3(\tau+1)=0) \wedge (r_3(\tau+1)=r_3(\tau)-0,5);$$

$$F(t_5): (v_2(\tau)=2) \wedge (d_3(\tau)=1) \wedge (d_4(\tau)=1) \wedge (r_3(\tau)>3) \wedge (r_4(\tau)>3) \rightarrow (d_5(\tau+1)=1) \wedge (d_3(\tau+1)=0) \wedge (d_4(\tau+1)=0) \wedge (r_3(\tau+1)=r_3(\tau)-0,3) \wedge (r_4(\tau+1)=r_4(\tau)-0,3);$$

$$F(t_6): (v_2(\tau)=3) \wedge (d_4(\tau)=1) \wedge (r_4(\tau)>3) \rightarrow (d_2(\tau+1)=1) \wedge (d_4(\tau+1)=0) \wedge (C_5(\tau+1)=C_5(\tau)+1) \wedge (r_4(\tau+1)=r_4(\tau)-0,5);$$

$$F(t_7): ((v_3(\tau)=0) \vee (s_2<4)) \wedge (d_5(\tau)=1) \wedge (r_1(\tau)>3,5) \wedge (r_2(\tau)>3,5) \rightarrow (d_0(\tau+1)=1) \wedge (d_5(\tau+1)=0) \wedge (C_6(\tau+1)=C_6(\tau)+1) \wedge (r_1(\tau+1)=r_1(\tau)-0,1) \wedge (r_2(\tau+1)=r_2(\tau)-0,1);$$

$$F(t_8): (v_3(\tau)=1) \wedge (s_2\geq 4) \wedge (d_5(\tau)=1) \wedge (r_1(\tau)>3) \wedge (r_2(\tau)>3) \rightarrow (d_6(\tau+1)=1) \wedge$$

$$\wedge (d_5(\tau+1)=0) \wedge (r_1(\tau+1)=r_1(\tau)-0,4) \wedge (r_2(\tau+1)=r_2(\tau)-0,4);$$

$$F(t_9): (s_1(\tau) \geq 4) \wedge (d_6(\tau)=1) \wedge (r_4(\tau) > 2) \rightarrow (d_k(\tau+1)=1) \wedge (d_6(\tau+1)=0) \wedge$$

$$(C_7(\tau+1)=1) \wedge (r_4(\tau+1)=r_4(\tau)-0,1).$$

Та или иная позиция графа целей C_i может достигаться, в том числе при выполнении операций d_j графа действий. При этом достигнутая в ней маркировка автоматически переносится в позицию-копию C_i на графе целей.

Алгоритм построения дискретных систем и анализа процессов с помощью интерактивных моделей на основе БИС показан на рис. 4.3.

Шаги 1.1 – 1.4 алгоритма на рис. 4.3:

- 1.1. Формирование конфигурации графа целей;
- 1.2. Формирование конфигурации графа действий;
- 1.3. Установление связей между графами;
- 1.4. Составление индикаторных выражений.

Преобразование БИС для следующего периода стабильности (этап 3, рис. 4.3) осуществляется с помощью метода «графохирургии».

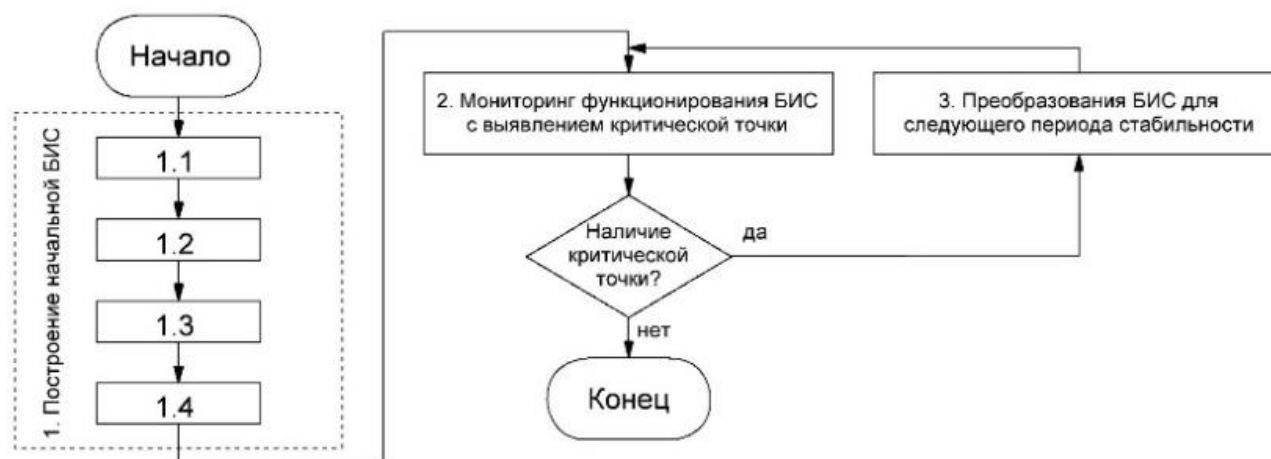


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритма построения дискретных систем и анализа процессов на основе БИС

Для проведения имитационного эксперимента с помощью БИС разработана программа «Приложение для моделирования бинарных индикаторных сетей» [36].

По сравнению с триадной сетью [35] БИС имеет упрощенную структуру, что сокращает затраты на проектирование систем.

Для моделирования систем массового обслуживания (СМО) предложена еще одна сетевая агентоцентрическая модель, основанная на индикаторных сетях. Она названа ООО-моделью (или «три О» моделью). Формальное описание ООО-модели (три «О» модели) представляется в виде:

$$3OM = \langle \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3 \rangle,$$

где: $\Gamma_1 = \{\Gamma_{11}, \Gamma_{12}, \dots, \Gamma_{1m}\}$ – множество графов (агентов) **обеспечения**, причем при $m=1$ имеет место один канал обеспечения (к примеру, один пункт приема товара в магазине), и это множество вырождается в один граф Γ_1 , а при $m>1$ имеет место распределенная система обеспечения, то есть система со множеством агентов-поставщиков;

$\Gamma_2 = \{\Gamma_{21}, \Gamma_{22}, \dots, \Gamma_{2n}\}$, $n > 1$ – множество графов (агентов) **обслуживания**, описывающих возможные варианты действий каждого агента-заявки;

Γ_3 – граф **отчетности**, включающий ключевые показатели работы систем и целевые ориентиры требуемых значений этих показателей.

Покажем методику построения ООО-модели на примере магазина самообслуживания. На рис. 4.4, 4.5 показан каждый из трех уровней модели – Обеспечения, Обслуживания, Отчетности (рис. 4.4 – сверху уровень обеспечения, снизу уровень обслуживания; рис. 4.5 – уровень отчетности). Текстовые описания позиций графов и наборы индикаторных формул даны ниже.

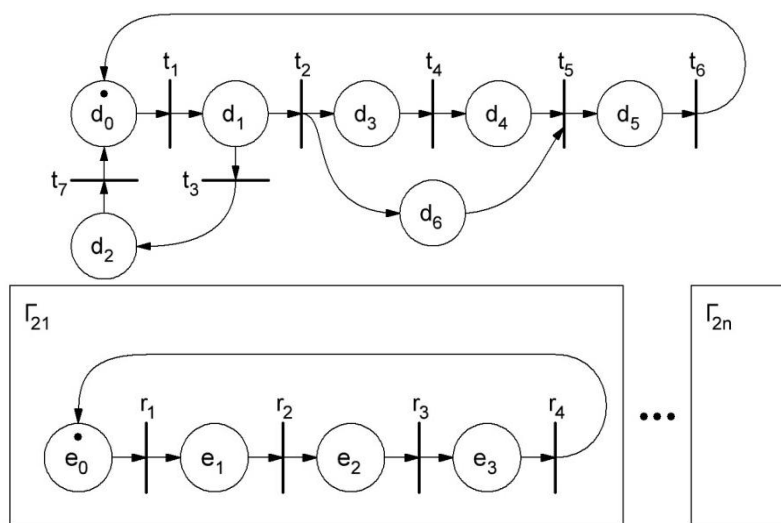


Рис. 4.4. Граф Γ_1 (сверху) приема партии товара – уровень Обеспечения, Граф Γ_{2i} (снизу) – взаимодействие с покупателем – уровень Обслуживания

Описание позиций графа Γ_1 уровня обеспечения: d_0 – ожидание партии товара; d_1 – приемка и проверка товаров по количеству и качеству; d_2 – возврат партии поставщику (в случае неудовлетворительного качества товара); d_3 – доставка товаров в зону хранения (склад); d_4 – предпродажная обработка (развешивание, упаковка и т.д.); d_5 – поступление в торговый зал; d_6 – сообщение о поступившем товаре в базу данных.

Индикаторные формулы для графа Γ_1 :

$$F(t_1): (d_0=1) \wedge (d_1=0) \wedge (K_0 \leq K_{0\text{крит}}) \rightarrow (d_0=0) \wedge (d_1=1);$$

$$F(t_2): (d_1=1) \wedge (d_3=0) \wedge (d_6=0) \wedge (K_1 \geq K_{1\text{min}}) \wedge$$

$$\wedge (K_2 = K_{2\text{зак}}) \rightarrow (d_1=0) \wedge (d_3=1) \wedge (d_6=1);$$

$$F(t_3): (d_1=1) \wedge (d_2=0) \wedge (K_1 < K_{1\text{min}}) \wedge (K_2 < K_{2\text{зак}}) \rightarrow (d_1=0) \wedge (d_2=1);$$

$$F(t_4): (d_3=1) \wedge (d_4=0) \rightarrow (d_3=0) \wedge (d_4=1);$$

$$F(t_5): (d_4=1) \wedge (d_6=1) \wedge (d_5=0) \rightarrow (d_4=0) \wedge (d_6=0) \wedge (d_1=1);$$

$$F(t_6): (d_5=1) \wedge (d_0=0) \rightarrow (d_5=0) \wedge (d_0=1) \wedge (K_0 = K_0 + K_2);$$

$$F(t_7): (d_2=1) \wedge (d_0=0) \rightarrow (d_2=0) \wedge (d_0=1).$$

Описание позиций графа Γ_{2i} : e_0 – ожидание покупателя; e_1 – отбор товаров (в корзину); e_2 – расчет в кассе; e_3 – сообщение в базу данных.

Индикаторные формулы, дополняющие каждый из графов Γ_{2i} :

$$\begin{aligned} F(r_1): (e_0=1) \wedge (e_1=0) \wedge (S_1=1) &\rightarrow (e_0=0) \wedge (e_1=1); \\ F(r_2): (e_1=1) \wedge (e_2=0) \wedge (K_3=K_{\text{п}}) &\rightarrow (e_1=0) \wedge (e_2=1); \\ F(r_3): (e_2=1) \wedge (e_3=0) \wedge (S_2=S_{\text{т}}) &\rightarrow (e_2=0) \wedge (e_3=1); \\ F(r_4): (e_3=1) \wedge (e_0=0) &\rightarrow (e_3=0) \wedge (e_0=1) \wedge (S_1=0). \end{aligned}$$

В индикаторные формулы помимо переменных-позиций d_i и e_j введены дополнительные переменные, задающие условия срабатывания переходов (K_0 – фактическое количество товара, $K_{0\text{крит}}$ – критическое количество товара (максимальная вместимость склада), K_1 – качество товара, $K_{1\text{мин}}$ – минимальное качество товара, при котором товар принимается от поставщика, K_2 – полученное количество товара, $K_{2\text{зак}}$ – количество товара, которое было заказано,

S_1 – появление в магазине нового покупателя (0 – покупателя нет, 1 – покупатель зашел в магазин), K_3 – количество товара в корзине, $K_{\text{п}}$ – количество товара, необходимое покупателю, S_2 – сумма денег, переданная покупателем кассиру,

S_m – стоимость товаров в корзине покупателя).

Основные показатели финансово-хозяйственной деятельности предприятия: p_1 – рентабельность; p_2 – чистая прибыль; p_3 – маржинальная прибыль;

p_4 – постоянные затраты; p_5 – налоги; p_6 – выручка; p_7 – переменные расходы; p_8 – расходы по оплате труда персонала; p_9 – затраты на закупку и транспортировку; p_{10} – маркетинговые расходы; p_{11} – объем продаж.

Индикаторные формулы для уровня отчетности магазина самообслуживания:

$$\begin{aligned} F(q_0): (p_1=1) \wedge (p_7=0) \wedge (p_8=0) \wedge (p_9=0) \wedge (p_{10}=0) \wedge (p_{11}=0) &\rightarrow (p_1=0) \wedge \\ &\wedge (p_7=1) \wedge (p_8=1) \wedge (p_9=1) \wedge (p_{10}=1) \wedge (p_{11}=1); \\ F(q_1): (p_2=1) \wedge (p_1=0) \wedge (P_2 \geq P_{2\text{мин}}) &\rightarrow (p_2=0) \wedge (p_1=1); \\ F(q_2): (p_3=1) \wedge (p_4=1) \wedge (p_5=1) \wedge (p_2=0) \wedge (P_3 \geq P_{3\text{мин}}) \wedge (P_4 \leq P_{4\text{макс}}) &\wedge \\ &\wedge (P_5 \leq P_{5\text{макс}}) \rightarrow (p_3=0) \wedge (p_4=0) \wedge (p_5=0) \wedge (p_2=1); \\ F(q_3): (p_6=1) \wedge (p_7=1) \wedge (p_3=0) \wedge (P_6 \geq P_{6\text{мин}}) \wedge (P_7 \leq P_{7\text{макс}}) &\rightarrow (p_6=0) \wedge \\ &\wedge (p_7=0) \wedge (p_3=1); \\ F(q_4): (p_8=1) \wedge (p_9=1) \wedge (p_{10}=1) \wedge (p_4=0) \wedge (P_8 \leq P_{8\text{макс}}) \wedge (P_9 \leq P_{9\text{макс}}) &\wedge \\ &\wedge (P_{10} \leq P_{10\text{макс}}) \rightarrow (p_8=0) \wedge (p_9=0) \wedge (p_{10}=0) \wedge (p_4=1); \\ F(q_5): (p_{11}=1) \wedge (p_6=0) \wedge (P_{11} \geq P_{11\text{мин}}) &\rightarrow (p_{11}=0) \wedge (p_6=1). \end{aligned}$$

Здесь заглавными буквами (P_i) обозначены значения показателей, а строчными (p_i) – позиции графа Γ_3 , обозначающие достижение нормативных значений соответствующих показателей. Маркеры сначала заносятся в нижние позиции графа (на рис. 4.5 это позиции $p_7 - p_{11}$) по достижению соответствующих значений показателей, а затем движутся по сети при срабатывании переходов.

На рис. 4.6 приведена блок-схема алгоритма анализа систем на основе ООМ-моделей.

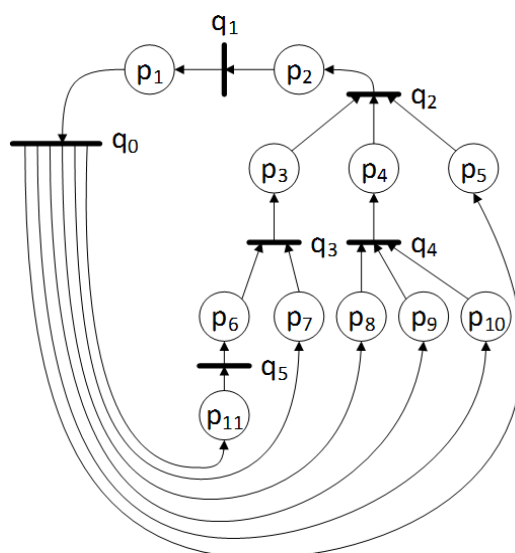


Рис. 4.5. Граф G_3 – основные показатели финансово-хозяйственной деятельности предприятия – уровень Отчетности



Рис. 4.6. Алгоритм ООО-моделирования

Общность подходов к их рассмотрению и предложенные сетевые модели показаны на рис. 4.7.

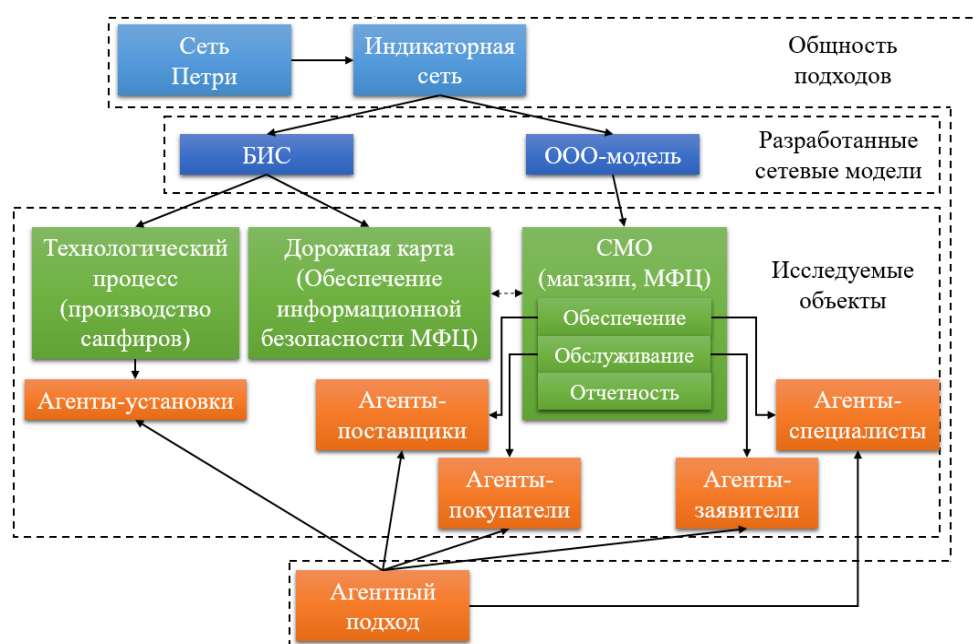


Рис. 4.7. Разработанные сетевые модели, исследуемые объекты, общность подходов при их рассмотрении

Описанные сетевые модели применены при построении и анализе ряда реальных систем и процессов, в частности: построена БИС, описывающая установку по выращиванию искусственных сапфиров; на основе БИС построен управляющий автомат для регулирования скорости вытягивания кристалла сапфира, построена имитационная модель для проведения экспериментов по модернизации технологического процесса; построена ООО-модель многофункционального центра предоставления государственных и муниципальных услуг (МФЦ); разработана бинарная сетевая дорожная карта «Обеспечение информационной безопасности МФЦ».

4.3. Выводы. Таким образом, в главе показаны основные идеи, реализованные при выполнении диссертационной работы А.В. Чуевым под руководством В.З. Магергута. Главным результатом этой работы стало введение новой формальной конструкции – бинарного структурированного агента, описываемого с помощью бинарной индикаторной сети. Предложенный подход, который назван агентоцентричным (агентоориентированным), обладает универсальностью, что подтверждается его успешным применением при моделировании и построении реальных систем совершенно разного типа, а также простотой и наглядностью для предметных специалистов.

Заключение

Данная статья написана в память о профессоре В.З. Магергута, его идеях и методах, которые уже воплотились и будут активно воплощаться в жизнь его учениками. Сформулированные и решаемые им задачи, направлены на достаточно широкую прикладную область для различных объектов технологического и технического характера. Каждое из представленных направлений формируется в отдельную ветвь научных исследований и активно развивается.

Методы и подходы, представленные в настоящей статье, разработаны и исследованы в рамках проекта РФФИ № 14-41-08016, руководителем которого с 2014 по 2016 годы был проф. В.З. Магергут.

Литература

1. Ломазов В. А., Петросов Д. А., Игнатенко В. А. Обзор графоаналитических инструментальных средств моделирования в задачах синтеза систем // Новая наука: опыт, традиции, инновации. 2015. № 6. С. 167-170.
2. Игнатенко В. А., Магергут В. З. Описание динамических процессов при помощи информационной сети Петри // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. № 13. С. 161-179.
3. Юдицкий С. А., Магергут В. З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
4. Игнатенко В. А., Магергут В. З. Информационная сеть Петри как инструмент для параллельной обработки алгоритмов управления // Научные

ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. № 19. С. 119-126.

5. Бажанов А. Г. Управление вращающейся печью для обжига цементного клинкера на основе нечетких диаграмм поведения ее узлов: дис. канд. техн. наук: 05.13.06: защищена 26.06.13: утв. 21.10.13. – Белгород: БГТУ. 2013. – 149 с.

6. Магергут В. З., Юдицкий С. А., Перов В. Л. Построение логических моделей химико-технологических объектов (первичные и исходные модели). – М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1988. – 80 с.

7. Бажанов А. Г., Магергут В. З. Нечеткая диаграмма поведения узла нагрузки главного привода цементной печи // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 5. С. 163-167.

8. Бажанов А. Г., Ващенко Р. А., Магергут В. З. Нечеткие диаграммы поведения узлов для сложных технологических объектов, принципы их построения и использования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 9. С. 26-34.

9. Ицелев Р. И., Кацман А. Д., Шидлович В. И. Автоматизированное управление обжигом при производстве цемента. – Л.: Стройиздат Ленингр. отделение. 1978. – 151 с.

10. Бернштейн Л. Г. Цементная промышленность США и пути реконструкции цементной промышленности России // Научно-испытательный центр «Гипроцемент-Наука» [Электронный ресурс]. 2011. – URL: <http://www.giprocement.ru/about/articles.html/p=10> (дата обращения 15.05.2016).

11. Magergut V. Z., Bazhanov A. G., Vashchenko R. A. Algorithmic Approaches to Synthesis Fuzzy Control Systems for Objects with Continuous Technology // World Applied Sciences Journal. 2013. № 24 (10). Pp. 1291-1295. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.10.7003.

12. Магергут В. З., Игнатенко В. А., Бажанов А. Г., Шаптала В. Г. Подходы к построению дискретных моделей непрерывных технологических процессов для синтеза управляющих автоматов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 100-102.

13. Bazhanov A., Magergut V., Vashchenko R. Operation model of the cement kiln node “Material temperature in the drying zone” as a fuzzy behavior chart // Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies, IEEE Xplore. Zilina. 2015. Pp. 35-38. doi: 10.1109/DT.2015.7222947.

14. Ващенко Р.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З., Карииков Е.Б. Советующая система для управления вращающейся печью // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. №2013618589. 2013.

15. Юдин Д. А. Автоматизированная система управления вращающимися печами с применением технического зрения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – 203 с.

16. Zhang Jing, Tong Tiaosheng, Li Fengcai, Lin Changxi. Rotary kiln intelligent control based on flame image processing. IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems ICIPS '97, 1997, vol. 1, pp. 796-792.

17. Zhang X., Chen H., Zhang J. The Predictive Control of Sintering Temperature in Rotary Kiln Based on Image Feedback and Soft Computing. Proceeding of: Third International Conference on Natural Computation ICNC 2007, 2007, vol. 3. Pp. 39-43. doi: 10.1109/ICNC.2007.734.
18. Zhang X., Chen H., Zou Z., Li J. Content-Based Rotary Kiln Flame Image Retrieval. Proceeding of Congress on Image and Signal Processing. 2008. CISP '08. Vol. 2. Pp. 490-494. doi: 10.1109/CISP.2008.578.
19. Wei Z. Y. Optical flow algorithm and research on its application to rotary kiln status recognition [D]. – Shenyang: Northeastern University. 2005. – 78 p.
20. Szatvanyi G. Improving quality and combustion control in pyrometallurgical processes using multivariate image analysis of flames. Master's thesis. – Quebec: Department of chemical engineering. Faculty of science and engineering, Laval University, 2006.
21. Liu J., Zhu Y., Sun P. Sintering status recognition system for cement rotary kiln. ICCASM 2010. Vol. 13. Pp. 212-216.
22. Порхало В. А., Рубанов В. Г., Шаптала В. Г. Автоматизация печи обжига клинкера на основе каскадной и многосвязной систем управления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 69-72.
23. Чурагулова О. А. Автоматизация производства цемента в России. Опыт компании «Сименс» // Цемент, известь, Гипс. 2008. №4. С. 156-157.
24. FLSmidth website. Process Control [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Cement/Products/Electrical+and+Automation> (дата обращения 20.06.2016).
25. ABB – Решения для цементной промышленности // Цемент и его применение. № 6. 2008. С. 24-30. – URL: [http://www05.abb.com/global/scot/scot393.nsf/veritydisplay/cb31605c0466ac65c1257b350030731a/\\$file/Solutions%20for%20the%20Cement%20Industry.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot393.nsf/veritydisplay/cb31605c0466ac65c1257b350030731a/$file/Solutions%20for%20the%20Cement%20Industry.pdf) (дата обращения 20.06.2016).
26. Система промышленного телевидения для обжиговых печей [Электронный ресурс]. – URL: <http://telesen.ru/index.php?main=services&id=100002&subid=100048> (дата обращения 20.06.2016).
27. Бехер Р. Анализ теплового процесса для оптимизации управления цементной печью на основе бесконтактного измерения температуры // Цемент и его применение. 2008. № 3. С. 64-65.
28. Юдин Д. А., Магергут В. З. Программный комплекс системы технического зрения для оценки состояния процесса обжига // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 257-262.
29. Юдин Д. А., Магергут В. З. Сегментация изображений процесса обжига с применением текстурного анализа на основе самоорганизующихся карт // Информационные технологии. 2013. № 4. С. 65-70.
30. Юдин Д. А., Магергут В. З. Применение метода экстремального обучения нейронной сети для классификации областей изображения // Научные

ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2013. Т. 26. № 8-1. С. 107-117.

31. Юдин Д. А., Магергут В. З. Оптимизация набора текстурных характеристик изображения на основе генетического алгоритма // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 4 (54). С. 67-71.

32. Yudin D., Magergut V., Rubanov V. Fuzzy control of rotary cement kiln using sintering zone image recognition // 10th International Conference on Digital Technologies (DT). 2014. Pp. 365-370. doi: 10.1109/DT.2014.6868741.

33. Чуев А. В. Формализация и анализ дискретных организационно-технологических систем со структурированными агентами на индикаторных сетях. Дис. ... канд. техн. наук. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – 164 с.

34. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.

35. Юдицкий С. А. Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. – М.: СИНТЕГ, 2012. – 112 с.

36. Юдицкий С. А., Магергут В. З., Чуев А. В. Программно-алгоритмическое обеспечение моделирования процессов на бинарных индикаторных сетях // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 9. С. 11-18.

References

1. Lomazov V. A., Petrosov D. A., Ignatenko V. A. Overview of graphic-analytical simulation tools in synthesis of systems problems. *Novaya nauka: opyt, traditsii, innovatsii*, 2015, vol. 6, pp. 167-170 (in Russian).

2. Ignatenko V. A., Magergut V. Z. Description of dynamic processes with information network of Petri. *Belgorod State University Scientific bulletin*, 2011, vol. 13, pp. 161-179 (in Russian).

3. Yuditskiy S. A., Magergut V. Z. *The logical control of discrete processes. Model, Analysis, synthesis*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 176 p. (in Russian).

4. Ignatenko V. A., Magergut V. Z. Information Petri net as a tool for concurrency control algorithms. *Belgorod State University Scientific bulletin*, 2011, vol. 19, pp. 119-126 (in Russian).

5. Bazhanov A. G. *Upravlenie vraschauscheisya pech'u dlya obzhiga cementnogo klinkera na osnove nechetkih diagramm povedeniya eyo uzlov*. Dis. cand. tekhn. nauk [Rotary kiln control for cement clinker calcination based on fuzzy behavior charts of its nodes]. Belgorod, Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2013. 149 p. (in Russian).

6. Magergut V. Z., Yuditskiy S. A., Perov V. L. *Postroenie logicheskikh modeley khimiko-tehnologicheskikh ob'ektov (pervichnie i ishodnie modeli)* [The construction of logical models for chemical and technological facilities (primary and original models)]. Moscow, Mendeleev Institute of Chemical Technology of Russia, 1988. 80 p. (in Russian).

7. Bazhanov A. G., Magergut V. Z. Fuzzy behavior chart of main drive load node. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, n. 5, pp. 163-167 (in Russian).
8. Bazhanov A. G., Vashchenko R. A., Magergut V. Z. Fuzzy nodes behavior charts for complex technological objects, principles of its construction and usage. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2014, vol. 9, pp. 26-34 (in Russian).
9. Icelev R. I., Kacman A. D., Shidlovich V. I. *Avtomatizirovannoe upravlenie obzhigom pri proizvodstve cementa* [Automated control of calcination in cement production]. Leningra, Stroiizdat Leningr. Otdelenie, 1978. 151 p. (in Russian).
10. Bernshtein L. G. *Cementa promishlennost' SShA I puti rekonstrukcii cementnoi promishlennosti Rossii* [Cement industry of USA and paths for reconstruction of cement industry of Russia]. Research and Testing Center "GiproCement Science and Quality Control" Ltd., 2011. Available at: <http://www.giprocement.ru/about/articles.html/p=10> (accessed 15 May 2016) (in Russian).
11. Magergut V. Z., Bazhanov A. G., Vashchenko R. A. Algorithmic Approaches to Synthesis Fuzzy Control Systems for Objects with Continuous Technology. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 24, no. 10, pp. 1291-1295. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.10.7003
12. Magergut V. Z., Ignatenko V. A., Bazhanov A. G., Shaptala V. G. Approaches to the construction of discrete models of continuous technological processes for control automata synthesis. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2013, vol. 2, pp. 100-102 (in Russian).
13. Bazhanov A., Magergut V., Vashchenko R. Operation model of the cement kiln node "Material temperature in the drying zone" as a fuzzy behavior chart. *Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies*, IEEE Xplore. Zilina, 2015, pp. 35-38. doi: 10.1109/DT.2015.7222947
14. Vashchenko R. A., Bazhanov A. G., Magergut V. Z., Karkiov E. B. *Sovetuyuschaya sistema dlya upravleniya vraschauscheisya pech'u. Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programm dlya EVM* [Advising system for control of rotary kiln. The Certificate on Official Registration of the Computer Program]. No. 2013618589, 2013 (in Russian).
15. Yudin D.A. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya vrashchayushchimisya pechami s primeneniye tekhnicheskogo zreniya*: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.06 [Automated control system for rotary kilns using machine vision. Ph.D. Thesis]. Belgorod, BSTU n.a. V.G.Shukhov, 2014. 203 p. (in Russian).
16. Zhang J., Tong T., Li F., Lin C. Rotary kiln intelligent control based on flame image processing. *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, ICIPS '97*, 1997, vol. 1, pp. 796-792.
17. Zhang X., Chen H., Zhang J. The Predictive Control of Sintering Temperature in Rotary Kiln Based on Image Feedback and Soft Computing. *Proceeding of Third International Conference on Natural Computation, ICNC-2007*, 2007, vol. 3, pp. 39-43. doi: 10.1109/ICNC.2007.734.

18. Zhang H., Chen X., Zou Z., Li J. Content-Based Rotary Kiln Flame Image Retrieval. *Proceeding of Congress on Image and Signal Processing, CISP-'08*, 2008, vol. 2, pp. 490-494. doi: 10.1109/CISP.2008.578.
19. Wei Z. Y. *Optical flow algorithm and research on its application to rotary kiln status recognition*. Shenyang: Northeastern University, 2005, 78 p.
20. Szatvanyi G. *Improving quality and combustion control in pyrometallurgical processes using multivariate image analysis of flames. Master's thesis*. Quebec, Department of chemical engineering, Faculty of science and engineering, Laval University. 2006.
21. Liu J., Zhu Y., Sun P. Sintering status recognition system for cement rotary kiln. *ICCASM*, 2010, vol. 13, pp. 212-216.
22. Porhalo V. A., Rubanov V. G., Shaptala V. G. Avtomatizatsiya pechi obzhiga klinkera na osnove kaskadnoy i mnogosvyaznoy sistem upravleniya [Clinker kiln automation based on multiply connected and cascade control systems]. *Bulletin of BSTU n.a. V. G. Shukhov*, 2013, vol. 2, pp. 69-72 (in Russian).
23. Churagulova O. A. Avtomatizatsiya proizvodstva tsementa v Rossii. Opyt kompanii «Simens». [Cement production automation in Russia. Experience of Siemens Company]. *Tsement, izvest, gips* [Cement, Lime, Gypsum], 2008, vol. 4, pp. 156-157 (in Russian).
24. FLSmidth website. Process Control. Available at: <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Cement/Products/Electrical+and+Automation> (accessed 20 June 2016).
25. ABB – Resheniya dlya tsementnoy promyshlennosti [ABB - Decisions for cement industry]. *Cement and its Applications*, 2008, vol. 6, pp. 24-30 (in Russian).
26. System of industrial television for kilns. Available at: <http://telesen.ru/index.php?main=services&id=100002&subid=100048> (accessed 20 June 2016) (in Russian).
27. Bokher P. Analiz teplovogo protsessa dlya optimizatsii upravleniya tsementnoy pechyu na osnove beskontaktnogo izmereniya temperatury [Thermal process analysis to optimize the cement kiln control based on contactless temperature measurement]. *Cement and its Applications*, 2008, vol. 3, pp. 64-65 (in Russian).
28. Yudin D. A., Magergut V. Z. Programmnyy kompleks sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya otsenki sostoyaniya protsessa obzhiga [Computer vision system software for assessment of firing process]. *Software and systems*, 2013, vol. 2, pp. 257-262 (in Russian).
29. Yudin D. A., Magergut V. Z. Segmentatsiya izobrazheniy protsessa obzhiga s primeneniye tekturnogo analiza na osnove samoorganizuyushchikhsya kart [Image segmentation of firing process with texture analysis based on self-organizing maps]. *Information technologies*, 2013, vol. 4, pp. 65-70 (in Russian).
30. Yudin D. A., Magergut V. Z. Primeneniye metoda ekstremal'nogo obucheniya neyronnoy seti dlya klassifikatsii oblastey izobrazheniya [Application of extreme learning machines for classification of image areas]. *Scientific bulletin of BelSU*, 2013, no. 26/1, pp. 107-117 (in Russian).
31. Yudin D. A., Magergut V. Z. Optimizatsiya nabora tekturnykh kharakteristik izobrazheniya na osnove geneticheskogo algoritma [Optimization of a

set of image texture features on base of genetic algorithm]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo*, 2014, vol. 4, no. 54, pp. 67-71 (in Russian).

32. Yudin D., Magergut V., Rubanov V. Fuzzy control of rotary cement kiln using sintering zone image recognition. *10th International Conference on Digital Technologies (DT)*, 2014, pp. 365-370. doi: 10.1109/DT.2014.6868741.

33. Chuev A. V. *Formalizaciya i analiz diskretnyh organizacionno-tekhnologicheskikh sistem so strukturirovannymi agentami na indikatornyh setyah. Diss. kand. tehn. nauk* [The formalization and analysis of discrete organizational and technological systems with structured agents on the indicator networks]. Ph. D. Thesis. Belgorod, BSTU n.a. V.G.Shukhov, 2016, 164 p. (in Russian).

34. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod* [Artificial Intelligence: A Modern Approach]. Moscow, Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2006, 1408 p. (in Russian).

35. Yudickij S. A. *Modelirovanie dinamiki mnogoagentnyh triadnyh setej* [Modeling the dynamics of multi-agent triad networks]. Moscow, SINTEG Publ., 2012, 112 p. (in Russian).

36. Yudickij S. A., Magergut V. Z., Chuev A. V. Programmno-algoritmicheskoe obespechenie modelirovaniya processov na binarnykh indikatornyh setyah [Software and algorithmic support of processes modeling on binary indicator networks]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*, 2014, vol. 9, pp. 11-18 (in Russian).

Информация об авторах

Игнатенко Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и информационных технологий. ФГБОУ ВО Белгородский государственный аграрный университет. Область научных интересов: сети Петри, промышленная автоматика, микропроцессорная техника. E-mail: bigsom@mail.ru

Адрес: 308033, Россия, г. Белгород, пр-кт. Ватутина, д. 8, кв. 26.

Бажанов Александр Геральдович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Область научных интересов: нечеткие системы, алгоритмизация технологических процессов, сетевые алгоритмы, имитационное моделирование и интеллектуальные системы управления. E-mail: all_exe@mail.ru

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Юдин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры технической кибернетики. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Область научных интересов: системы технического зрения, робототехника. E-mail: yuddim@yandex.ru

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чуев Александр Викторович – кандидат технических наук. Программист Государственное автономное учреждение Белгородской области

"Многофункциональный центр предоставления государственных и муниципальных услуг" (ГАУ БО "МФЦ"). Область научных интересов: сети Петри, имитационное моделирование систем. E-mail: chuev_a@mail.ru

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Юдицкий Семен Абрамович – профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник. Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: системный анализ, логическое моделирование, организационно-технологические системы. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Адрес: 117321, Москва, Профсоюзная ул. 132, кор. 8, Московский дом-пансионат ветеранов науки, ком. 305.

Agent Centric Modeling of Organizational and Technological Systems

V. A. Ignatenko, A. G. Bazhanov, D. A. Yudin, A. V. Chuev, S. A. Yuditsky

Formulation of the problem: development of effective control systems for organizational and technological systems (OTS) requires their modeling and hardware and software implementation that enhance the rising of products quality of the process, reducing production costs, improving productivity and working conditions of staff. For some objects, such as rotary kilns of wet cement production method, sapphire crystals growing plants, there is a difficult to build an analytical model of the control system. So we propose the research of intelligent methods and network-based approaches for implementation of this task. **The objective of work** is the development, expansion and formalization of the OTS modeling methodology within the work carried out in Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov under the supervision of prof. V.Z. Magergut. To achieve this objective there has been used a several conceptual ways: the usage of the network model for analog data processing, the application of fuzzy behavior charts of nodes for modeling and synthesis of control automata for complex technological objects, the usage of machine vision in the control system for complex technological object, formalization and analysis of discrete organizational and technological systems with structured agents on the indicator networks. **Used methods:** as methods for solving the problem of agent-centric modeling used methods of Petri nets, including their modifications - information and binary indicator nets, methods of fuzzy behavior charts of nodes, methods of neural networks, in particular, Kohonen maps, methods of data classification, including, support vector method and extreme training method. **Novelty:** the elements of novelty of presented solutions are the proposed information Petri net for analog data processing, the method of models construction and synthesis of control automata for complex technological objects on the basis of fuzzy behavior charts of nodes, the method of assessing the state of the sintering zone and the parameters of the kiln calcination process based on image recognition, structure of advising control system for rotary cement kiln using machine vision, the proposed OTS network model based on binary indicator networks and concept "Maintenance-Service-Reporting". **Result:** described in this article approaches have shown its efficiency in solving practical problems. Modeling of the closed-loop control system was successfully carried out with the help of an information Petri net. Application of fuzzy behavior charts of nodes has allowed to adequately generate the advice for rotary kiln control. Application of machine vision system has allowed to carry out evaluation of the sintering zone state with an average accuracy of above 94%, as well as to use the visual data in the kiln control system, thereby improving the efficiency of decision-making of operators on 12%. By using the binary indicator networks was obtained an adequate model of the installation of the artificial sapphires growing, was developed a binary network roadmap of information security support in the regional multi-functional center. **Practical value:** the results are implemented at the cement plant JSC "Oskolcement" (Stary Oskol), in the multifunctional center of state and municipal services of Belgorod region.

Keywords: agent-based approach, information Petri net, binary indicator Petri net, fuzzy behavior chart, fuzzy control, vision system, state estimation, extreme training method, rotary cement kiln.

Information about Authors

Vladimir Alexandrovich Ignatenko – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technology. Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin. Field of research: Petri net, industrial automation, microprocessor technology. E-mail: bigsom@mail.ru.

Address: Russia, 308033, Belgorod, Vatutina pr-kt, 8-26.

Alexander Geraldovich Bazhanov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics. Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. Field of research: fuzzy systems, algorithmization of technological processes, net algorithms, simulation and intelligent control systems. E-mail: all_exe@mail.ru

Address: Russia, 308012, Belgorod, Kostukova street, 46.

Dmitry Aleksandrovich Yudin – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior lecturer of the Technical Cybernetics Department of Cybernetics. Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov. Field of research: machine vision systems, robotics. E-mail: yuddim@yandex.ru

Address: Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Aleksandr Viktorovich Chuev – Ph.D. of Engineering Sciences. Programmer. State autonomous institution of the Belgorod region "Multifunctional center of public and municipal services" (SAI BR "MFC"). Field of research: Petri net, simulation systems. E-mail: chuev_a@mail.ru

Address: Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Semen Abramovich Yuditsky – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Chief Researcher. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Field of research: system analysis, logic modeling, organizational and technological systems. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Address: Russia, 117321, Moscow, Profsoyuznaya street, 132, Bld. 8, Ft. 305, Moscow Pension House of Science Veterans.