

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Специальность: 1203.01 Компьютерные науки

Отрасль науки: Технические науки

Соискатель: **Шахла Сурхай гызы Гусейнзаде**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора наук

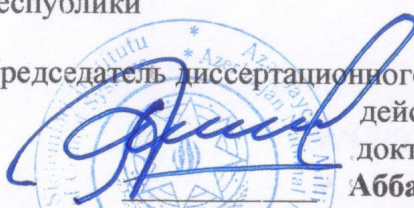
Баку–2023


Диссертационная работа выполнена на кафедре информатики
Сумгаитского государственного университета

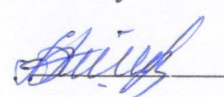
Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Валех Азад оглу Мустафаев

Официальные оппоненты: член-корреспондент НАНА,
доктор технических наук
Рамиз Магомед оглу Алыгулиев
доктор технических наук, профессор
Алекпер Али Ага оглу Алиев
доктор технических наук, профессор
Латафат Аббас гызы Гардашова
доктор технических наук, профессор
Наиля Фуад гызы Мусаева

Диссертационный совет ED 1.20 Высшей Аттестационной
Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики,
действующий на базе Института систем управления
Министерства науки и образования Азербайджанской
Республики

Председатель диссертационного совета:

действительный член НАНА,
доктор технических наук, профессор
Аббасов Али Магамед оглу

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор философии по технике, доцент
Ализаде Тахир Али оглу

Председатель научного семинара:

доктор технических наук, профессор
Гасанов Аллахверди Биьякир оглу

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень выполнения темы. В настоящее время соответственно направлениям развития современного информационного общества активно разрабатываются методы и средства создания математического, алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных систем управления (ИСУ). ИСУ предназначены для управления и анализа сложных динамических систем (ДС) с поддержкой нечеткой логики, принятия решения и прогнозирования в условиях наличия нечеткого, стохастического, неточного характера неопределенностей в моделируемых объектах.

К сложным ДС относятся производственные, метеорологические, транспортные, технологические, организационные, социологические и другие системы, функционирующие в различной степени ресурсных и информационных ограничений. При создании ИСУ сложных ДС значительное место имеет разработка математических методов, алгоритмов и программных обеспечений моделирования, основанных на современных теориях. Средства описания логических, качественных, количественных и системных зависимостей являются важными составными компонентами моделирования объектов управления (ОУ).

ИСУ отличаются использованием методов теории искусственного интеллекта и решения в них принимаются на основе экспертных знаний. В состав ИСУ входят подсистемы моделирования разного типа: модели логического вывода, имитационные модели (ИМ), модели принятия решений, нейро-сетевые модели, аналитические модели, модели выбора наилучших вариантов, продукционные модели и др. Вопросами моделирования сложных ДС и в том числе ИСУ занимались и посвятили свои научные работы многие ученые, ниже перечислены имена некоторых из них: Заде Л.А., Мамдани Э., Алиев Р.А., Поспелов Д.А., Поспелов Г.С., Ларичев О.И., Пегат А., Левинсон С.К., Дженсен К., Кристенсен Л.М., Ахмедов М. А., Мустафаев В.А., Зайцев Д.А., Рыбина Г.В., Кайд Х., Наби

Х.З., Нильссон Н.Дж., Джянг Дж.К. и др.

Исследование поведений процессов и закономерностей функционирования сложных ДС в неопределенных ситуациях, разработка и усовершенствование методов, алгоритмических и программных обеспечений моделирования при создании ИСУ являются актуальными, так как надежность, прогнозируемость, модифицируемость при проектировании и функционировании сложных ДС являются необходимыми свойствами, приводящими к устранению аварийных ситуаций и повышению производительности. Вопросы создания ИСУ, являются приоритетным направлением исследований ведущих в мире научных организаций: International Federation of Accountants – IFAC, Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, Association for Computing Machinery – ACM и приложения этого направления находят наиболее многочисленные области применения в науке и производстве, что подтверждает актуальности поставленной задачи.

ДС состоят из компонентов, которые в зависимости от ситуации системы находятся в некотором состоянии и осуществляя переход от одного состояния к другому состоянию, система функционирует по некоторым определенным условиям, что соответствует принципиальной структуре сетей Петри (СП). У СП имеются возможности модифицируемости и анализа разработанных моделей. На основе перечисленных свойств для управления, мониторинга и анализа сложных ДС осуществлён выбор разных расширенных и совмещенных-расширенных модификаций формального аппарата СП для имитационного моделирования при разработке ИСУ сложных ДС.

Для разработки ИСУ сложных ДС от модификаций СП требуется представление последовательностей явлений, параллелизма событий, типов и динамики ресурсов, взаимосвязи составных элементов, неопределенного характера среды функционирования отдельных элементов и системы в целом. В результате проведенных исследований выявлено, что имеются некоторые современные программно-инструментальные средства для построения сложных ДС на основе ординарных и

некоторых расширенных СП (Petri network, AT-Технология, PIPE, RTXPS, Rdo, TiPeNeSS, DCNET, RTworks и др.), в которых учтены отображения некоторых вышеперечисленных факторов по отдельности, из-за чего они недостаточно представляют современных тенденций и не имеют более интегрированного и комплексного подхода для решения поставленной задачи. По вышеперечисленным причинам современные средства построения ИСУ сложных ДС не удовлетворяют и не соответствуют сегодняшним требованиям и есть необходимость в исследовании.

Актуальность обуславливается и с тем, что при проектировании ДС имеется высокая степень риска возникновения ошибок. Проявления этих ошибок показывают себя аварийными, тупиковыми ситуациями при эксплуатации и все это обходится очень высокой ценой. Традиционный подход – аналитические методы системного анализа, описываемые разными типами (дифференциальными, интегральными, нелинейными и др.), уравнениями, не совсем корректно применим и трудно решаемый из-за высокой сложности ДС. По этим причинам в настоящее время в связи с высоким развитием компьютерных систем и технологий устойчивый интерес проявляется к подходу моделирования сложных ДС с применением ИМ на СП, обогащённых элементами искусственного интеллекта (ИИ). Многие работы посвящаются задачам разработки, анализа и синтеза ИМ на разных расширенных СП. В диссертационной работе с целью создания ИМ ИСУ сложных ДС, в качестве базового метода предлагается математический аппарат на основе комбинированных, интегрированных модификаций расширенных СП. При моделировании ИСУ сложных ДС часто приходится описывать дискретных процессов параллельно с непрерывными, обрабатывать и четкие, и нечеткие параметры, что приводит к гибридизацию за счет интеграции модифицированных конструкций расширенных СП и методов ИИ. Такой подход компенсирует недостатки и современных методов ИИ, и методов моделирования СП, что служит сближению к более

реальной природе процессов и естественному интеллекту.

Предварительный анализ показал, что интегрированные модификации СП, использующие раскрашенные, нечеткие, стохастические конструкции являются перспективной основой при разработке ИСУ сложных ДС, что подтверждает актуальность темы диссертационной работы.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются модели ИСУ сложных ДС, функционирующих в неопределенной среде, разработанные с применением разных модификаций расширенных СП. Предметом исследования является усовершенствование и разработка методов, алгоритмического и программного обеспечения моделирования ИСУ сложных ДС на основе расширенных модификаций раскрашенных, нечетких, стохастических СП и их интегрированных вариантов.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является усовершенствование существующих и разработка новых методов, алгоритмических и программных средств, для построения ИСУ сложных ДС, на основе раскрашенных, нечетких, стохастических расширенных модификаций СП и их интегрированных вариантов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе выполнены следующие научно-практические задачи:

1. Обзор литературных источников по развитию исследований и разработок в области ИСУ, по применению элементов ИИ в сложные ДС, по определению роли имитационного моделирования в создании ИСУ сложных ДС и моделирующих возможностей математического аппарата имитационного моделирования разных типов расширенных СП, анализ применимости комбинированных и интегрированных модификаций раскрашенных, нечетких, стохастических СП для разработки моделей ИСУ сложных ДС;

2. Разработка подходов и методов создания ИМ функционирования сложных ДС с применением математического аппарата имитационного моделирования расширенных СП с возможностью представления и

оперирования неопределенной информацией неточного, нечеткого и стохастического характера;

3. Разработка математического и алгоритмического обеспечения функционирования предложенных расширенных модификаций СП типов: обобщенных раскрашенных сетей Петри (РСП); комбинированных модификаций нечетких сетей Петри (НСП) и стохастических сетей Петри (ССП); интегрированных нечетких раскрашенных сетей Петри (НРСП) и раскрашенных стохастических сетей Петри (РССП);

4. Разработка моделей управления на основе обобщенной РСП, комбинированных модификаций расширенных НСП, ССП и интегрированных НРСП, РССП.

5. Представление гибридного подхода к моделированию автоматизированного интеллектуального управления с применением интегрированного имитационного аппарата НРСП, метода нечеткого логического вывода и программно-инструментальных систем моделирования CPN Tools и MATLAB;

6. Построение визуально-имитационных граф-моделей интеллектуальных сложных ДС с применением комбинированных и интегрированных расширенных СП;

7. Программная реализация разработанных алгоритмов на основе предложенных методов на языке CPN ML в плане их дополнения в стандартное программное обеспечение системы;

8. Экспериментальная компьютерная симуляция и верификация разработанных моделей управления сложных ДС на приложении CPN Tools и проведение анализа с применением свойств анализа СП;

9. Разработка метода преобразования конечного автомата (КА) в СП для анализа и синтеза сложных ДС, определенные подсистемы которых моделированы с применением КА, основанного на отображении таблиц переходов и выходов КА в матрицы входных и выходных инцидентов СП. Автоматизация разработанного метода и верификация полученных результатов по топологию преобразования КА в СП.

Методы исследования. Для решения поставленных

задач использованы методы компьютерного моделирования, эвристические методы, методы построения функций принадлежности, методы имитационного моделирования, методы матричной теории, методы нечеткого логического вывода, методы компьютерной графики и визуализации, также теория нечетких множеств, теория СП и их модификаций, теория конечных автоматов, методы построения алгоритмов, методы разработки и тестирования программного обеспечения, методы симуляции и верификации моделей.

Основные положения, выдвинутые на защиту. В диссертации выдвинуты на защиту следующие положения:

1. Формальное математическое представление сложных динамических интеллектуальных систем (ДИС) и ИСУ;

2. Математические формализации и алгоритмические обеспечения функционирования обобщенных РСП и комбинированных модификаций расширенных НСП и ССП;

3. Интегрированные модификации расширенных НРСП и РССП, соответственно обладающие преимуществами расширенных модификаций РСП, НСП и ССП;

4. Модели на основе обобщенных, комбинированных и интегрированных модификаций расширенных РСП, НСП и ССП, модели автоматизации адаптивного нечеткого управления с применением интегрированных НРСП;

5. Гибридная методология моделирования автоматизированного интеллектуального управления на основе интегрированной расширенной НРСП и модель нечеткого управления скоростью водяного насоса с применением представленного гибридного моделирования;

6. Программная реализация разработанных алгоритмов на языке CPN ML как дополнение в программное обеспечение системы CPN Tools;

7. Методология построения имитационных-визуальных граф моделей сложных ДС на CPN Tools с применением разработанных типов комбинированных и интегрированных модификаций расширенных СП;

8. Результаты симуляции и верификации разработанных моделей на приложении CPN Tools и анализа разработанных моделей сложных ДС на комбинированных и интегрированных СП, с применением свойств анализа СП;

9. Методика преобразования КА в СП на основе теории матриц, алгоритм и программная реализация автоматизации преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инцидентов СП имитирующей КА в системе программирования C++.

Научная новизна исследования. Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Определены и систематизированы характерные особенности сложных ДС, нуждающихся интеллектуальному управлению и требования, предъявленные к современным системам управления, разработаны формальные математические представления ДИС и ИСУ. Исследованы назначение, области применения, виды и тенденции в применении различных методов имитационного моделирования при разработке ИСУ;

2. Обоснован выбор расширенных СП в роле базисного математического формализма при моделировании ИСУ сложных ДС на основе определенных свойств и возможностей, выявленных обобщением сорокалетнего мирового опыта создания расширенных СП. Систематизированы выявленные преимущества и недостатки наиболее распространенных классов расширенных СП, на основе которых определено направление развития расширенных модификаций СП, соответствующее современным требованиям теории системного моделирования – обобщение, комбинирование и интегрирование расширенных модификаций СП;

3. Разработан алгоритм функционирования обобщенных РСП, представляющий основных этапов математической формализации объединения двух концепций – перерождающих и селективных РСП, на основе которого разработана модель управления модуля обрабатывающий центр в гибкая производственная система (ГПС) механообработки,

подтверждены преимущества обобщенных РСР по сравнению с базовыми конфигурациями;

4. Разработана модель определения устойчивости "в целом" эволюционного нечеткого регулятора с применением РСР в системе CPN Tools, позволяющая анализировать последовательность функционирования блоков эволюционного нечеткого регулятора до возвращения к начальному состоянию, что считается значительной задачей при проектировании;

5. Разработана комбинированная модификация НСП трех видов, где переходам присвоены функции принадлежности нечеткого срабатывания и нечеткого порога срабатывания, и вида, где позициям присвоены функции принадлежности наличия одного маркера в соответствующей позиции данной сети, обладающая преимуществами всех трех видов. Показана соответствие модификации к моделированию нечетких продукционных правил. Моделирована система контроля производственного модуля с применением представленной комбинированной НСП.

6. Разработаны комбинированная модификация ССП и алгоритм ее функционирования, представлена интегрированная РСР на основе РСР и комбинированной ССП для удобства решения конкретных задач моделирования сложных ДС с вероятностными свойствами, которые расширяют моделирующие возможности относительно базовых ССП. Обоснована, что РСР обеспечивают более прозрачное интерпретирование динамики меток в ССП и более качественного анализа процесса моделирования;

7. Разработана интегрированная модификация НРСР, получаемая путем интеграции расширенных НСП и РСР, в которой функции принадлежности термов лингвистической переменной присвоены к маркерам в роле цвета, дугам вставлены нечеткие условия существования, преимущества которой демонстрированы на разработанной модели автоматизации адаптивного нечеткого управления процессом включения и отключения водяных насосов соответственно уровням воды в насосном колодце. Доказано, что

представленная НРСП сужает модельное пространство и имеет более широкий спектр объектов моделирования, в отличии от базовых НСП и РСР.

8. Разработана оригинальная гибридная методология автоматизированного интеллектуального управления на основе интегрированной расширенной НРСР, определены структура и содержание гибридизации и поддерживающие программно-инструментальные системы. С применением представленного гибридного моделирования разработана модель нечеткого управления скоростью водяного насоса, которая обеспечивает более точную и плавную регулировку вращения в пределах нагрузок соответственно режимам водопотребления, по сравнению с другими известными моделями.

9. Разработана методика преобразования КА в СР на основе преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инцидентий СР. Выдвинуты и доказаны теоремы представляющие формулы для составления элементов матриц инцидентностей СР имитирующей КА. Разработан алгоритм автоматизации преобразования КА в СР, на основе которого выполнено построение СР преобразованной от заданной модели в виде КА. Разработан программный модуль алгоритма преобразования КА в СР в системе программирования С++.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в создании подходов и методов моделирования, базирующих на обобщенных, комбинированных и интегрированных модификаций расширенных СР, алгоритмического и программного обеспечения функционирования ИМ разработанных на основе предложенных модификаций, ориентированных на использование в создании ИСУ сложных ДС. Разработанные средства позволяют глубоко и более плавно отобразить свойства объекта моделирования, приблизить формальные модели к реальным, упростить процесс моделирования и делать моделей более компактным. Полученные результаты позволяют

расширить возможностей системы CPN Tools и современных компьютерных систем имитационного моделирования на основе СП в целом. Практическая значимость исследования определяется также эффективной применимостью разработанного математического, алгоритмического и программного обеспечения в создании ИСУ сложных ДС, таких как ГАП, электроэнергетические системы, проектирование сложных дискретных устройств.

Достоверность научных результатов подтверждена методологической строгостью с позиций теории систем, обоснованием утверждений, теоретическими выкладками, проведенными компьютерными симуляциями разработанных ИМ, анализом полученных данных компьютерных экспериментов, применением фундаментальных принципов компьютерного моделирования, графическими представлениями вычисленных значений функций принадлежности и результатов логического вывода, математическим доказательством теорем и сравнением полученных данных моделирования с данными, существующими в научной литературе.

Представленные в диссертации методология и технология разработки обобщенных, интегрированных и гибридных моделей являются оригинальными и позволяют редуцировать и снизить сложность практических задач, подобрать более адекватные виды методов, релевантных свойствам исследуемого ОУ, синтезируя и интерпретируя расширенных модификаций СП для решения проблем, вызванных искажениями и ограничениями традиционных методов моделирования.

Апробация и применение. Основные результаты диссертации обсуждались на нижеследующих республиканских и международных научно-технических конференциях:

1. The 5th International Conference on control and optimization with industrial applications. COIA. (Baku, august 27 – 29, 2015);

2. Международная научно–техническая конференция «Интеллектуальные технологии в машиностроении». (Baku, 28

– 30 сентября, 2016);

3. Республиканская научная конференция «Задачи прикладной математики и новые информационные технологии», (Сумгаит, 15 – 16 декабря, 2016);

4. Международная научная конференция «Теоретические и прикладные проблемы математики», (Сумгаит, 25 – 26 мая, 2017);

5. Международная научно–техническая конференция «Наука, технология, производство – 2017. Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств», (Уфа, 22 мая, 2017);

6. XXXI International Conference “Problems of Decision Making Under Uncertainties – PDMU”, (Lankaran, July 3 – 8, 2018);

7. Международная научная конференция «Информационные системы и технологии. Достижения и перспективы», (Сумгаит, 15 – 16 ноября, 2018);

8. International Conference "Modern Problems of Innovative Technologies in Oil and Gas Production and Applied Mathematics", (Baku, December 13 – 14, 2018);

9. II Всероссийская научная конференция с международным участием: «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения», (Тольятти, 22 – 24 апреля, 2019);

10. V Международная Научно–практическая очно–заочная конференция «Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий», (Оренбург, 22 марта, 2019);

11. XXXII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ», (Санкт Петербург, 3 – 7 июня, 2019);

12. Республиканская научная конференция «Актуальные проблемы математики и механики», (Баку, 2 – 3 мая, 2019);

13. XIII Международная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», (Махачкала, 16 – 20 сентября, 2019);

14. Сборник трудов Международной научно–технической

конференции «IT–технологии: развитие и приложения», (Владикавказ, 12 – 13 декабря, 2019);

15. “Azərbaycan və Türkiyə Universitetləri: təhsil, elm, texnologiya” I Beynəlxalq elmi–praktiki konfransı, (Bakı, 18 – 20 dekabr, 2019);

16. Международная научно – практическая очно – заочная конференция «Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий», (Оренбург, 20 марта, 2020);

17. Республиканская научная конференция «Фундаментальные проблемы математики и применение интеллектуальных технологий в образовании», (Сумгаит, 23 – 24 апреля, 2020);

18. Международная научная конференция «Информационные системы и технологии. Достижения и перспективы», (Сумгаит, 09 –10 июля, 2020).

19. 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA–2020), (Baku, august 26 – 28, 2020);

20. 2nd International Scientific–Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of ASOIU “Modern information, measurement and control systems: problems and perspectives, MIMCS’2020”, (Baku, november 05 – 06, 2020);

21. XV International Conference “Measurement and control in complex systems (MCCS)”, (Vinnytsia: VNTU, october 8 – 10, 2020);

22. V All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Energy Efficiency: Science, Technology, Energy", (Kyiv, november 25, 2020);

23. VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых: «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», (Тольятти, 20-22 апреля, – 2021);

24. XIV Международная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики»,

(Махачкала, 16–19 сентября 2021);

25. Республиканская научная конференция «Задачи прикладной математики и новые информационные технологии», (Сумгаит, 09 – 10 декабря, – 2021).

26. 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA-2022), (Баку, 24 – 26 August, – 2022);

27. Республиканская научная конференция «Прикладные задачи математики и новые информационные технологий», (Сумгаит, 15 – 16 декабря, – 2022).

Название организации, в которой выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Сумгаитском государственном университете на кафедре информатики.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Содержание работы изложено на 275 страницах, включая 40 рисунков, списка литературы из 201 наименований.

Объем со знаком общего и структурного разделов диссертационной работы распределяется примерно следующим образом:

- ✓ Общий – 380000 знак;
- ✓ Введение – 19800 знак;
- ✓ Первая глава – 81000 знак;
- ✓ Вторая глава – 63000 знак;
- ✓ Третья глава – 87000 знак;
- ✓ Четвертая глава – 74000 знак;
- ✓ Пятая глава – 52000 знак;
- ✓ Заключение – 4900 знак.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определена степень выполнения темы диссертационной работы, показаны объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведены использованные методы исследования и основные положения, выдвинутые на защиту. Кроме того, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, апробация, объем и структура диссертационной работы.

В первой главе исследованы современное состояние и пути развития ИСУ, характерные особенности сложных ДС и подходы к их моделированию, на основе литературных источников. Определены роль имитационного моделирования в создании ИСУ, свойства общего назначения и инженерно-научных применений ИМ. Выявлены требования к использованию ИМ при моделировании ИСУ сложных ДС, определены свойства и тенденции развития теории СП и расширенных модификаций, которые дают основу рассмотреть СП в роле базисного формализма при разработке ИСУ. Произведен анализ современных программных инструментальных систем, построенных на основе теории СП, обоснован выбор базовой программно-инструментальной системы, соответствующей исследованиям и разработкам в области ИСУ.

Определены основные аспекты при исследовании современного состояния и разработок в области ИСУ: сущность, области, процессы интеллектуального управления; назначения, отличительные признаки ИСУ и классификация по различным критериям; классификация методов представления знаний в ИС; требования, предъявленные к современным ИСУ; направления развития математических методов, подходов, алгоритмических и программных средств в области создания ИСУ; назначения, области применения и виды ИМ, в том числе СП; тенденции в применении различных расширенных модификаций СП при создании ИСУ. Учитывая выявленных при исследовании

основных аспектов о составной части и заданных определений, представлена математическая формализация ИСУ.

На основе проведенного анализа исследований литературных источников в целях определения современного состояния ИСУ, моделирования сложных ДС, подходов к моделированию ИСУ с применением расширенных СП выявлены:

– Существенное различие имеется между действием и восприятием, между рассуждениями и математическими операциями, между присутствующими действительными и лабораторными поведением ОУ. Реальное поведение сложных ДС еще не совсем близки к построенным компьютерным прототипам и повышение эффективности моделирования обуславливается применением современных тенденций ИИ, через которого ИСУ будет готова информировать о поведении ОУ не только на основе анализа генерированных данных, но и на основе экспериментального дизайна мышления и логического вывода. Отсутствует единый подход к математической формализации ИСУ;

– Классическая теория моделирования систем не в состоянии выполнить окончательных решений, соответствующих факторам неопределенности нечеткого, стохастического, неточного типа, которых необходимо учитывать при разработке современного алгоритмического и программного обеспечения ИСУ. При условиях сложности объекта моделирования и невозможности его адекватного аналитического описания или возможности представления математическими уравнениями не имеющими решения целесообразно обращаться к ИМ. Компетентный выбор ИМ определяет адекватность и качество моделирования;

– Характерные особенности – совместимость функционального и структурного моделирования, визуализация процессов, выразительность логических зависимостей, возможности декомпозиции и комплексного анализа позволяют выбрать аппарата имитационного моделирования СП, в качестве основного базисного математического формализма для

исследований сложных ДС. Расширенные модификации СП и ихние обобщенные, комбинированные, интегрированные варианты приводят к разработке более компактной, визуально преследуемой, математически анализируемой, близкой к реальным ОУ моделей.

– Рациональна разработка подходов применения СП для эффективного решения задач моделирования систем, требующих включения элементов ИИ, но в большинстве случаев при решение подобных задач с применением СП требуется выполнение дополнительных действий, что приводит к повышению числа переходов и позиций сети и следовательно, к построению громоздких моделей. Выход из положения является разработка различных модификаций СП, с расширенными возможностями.

– РСР, ССП, НСП и ВСП – более распространенные расширения имеют возможностей описания функциональных свойств ОУ и основаны на введение соответственно стохастических, нечетких, временных параметров на структурные элементы ординарных СП и на средства изменения интерпретации исполняемых переходами сети функций. Существующие расширенные СП имея своеобразные преимущества все еще сталкиваются с трудностями, чтобы интерпретировать эвристическое познание экспертов и особенности различных сложных ОУ;

– Обобщенные, комбинированные и интегрированные модели сочетают возможностей разных типов расширенных классов моделей СП, с целью обладания существенно больших описательных, функциональных свойств и методов анализа. Кроме того, интегрированные СП обеспечивают наиболее высокую визуальную выразительность моделей и возможностей обработки неопределенных данных для выявления функциональных, структурных закономерностей системы и для обмена данными в ИСУ;

– Владение высокими возможностями визуальной выразительности, методами анализа и верификации моделей, открытым принципом внесения программных модулей к

отдельным структурным элементам для решения разных типов задач и для расширения возможностей самой теории моделирования СП дают основу принимать программно-инструментальную компьютерную систему CPN Tools важным фактором для дальнейших исследований при разработке ИСУ сложных ДС с внесением программных модулей, оперирующих качественными параметрами на основе разработанного математического и алгоритмического обеспечения.

Проведенный анализ литературных источников по тематике показал, что имеется ряд нерешенных задач, представляющих теоретический и практический интерес, на основе которых определены задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена вопросам моделирования с применением РСП. Разработан алгоритм функционирования обобщенных РСП. Разработана модель управления модуля механообработки в гибкой производственной системе с применением обобщенной РСП. Разработана модель для анализа устойчивости эволюционного нечеткого регулятора с применением РСП в системе CPN Tools.

Определено, что при современной теории РСП используются типы данных в языках программирования и сам цвет может формироваться как тип¹. Модель на РСП, обычно создается на начальных этапах проектирования, в дальнейших постепенно уточняется до получения более подробного и корректного описания моделируемого ОУ. Это свойство помогает снизить имеющуюся различию между рассуждениями и алгоритмическими операциями, между реальными поведением и компьютерными прототипами ОУ и открывают широкий спектр областей применения перед РСП, в том числе реконфигурируемых систем.

Выявлено, что во всех преимуществах и в теоретическом, и в практическом аспекте не все вопросы разрешены, в

¹ Jensen, K., Kristensen, L.M. Colored Petri Nets: A Graphical Language for Formal Modeling and Validation of Concurrent Systems // Communications of the ACM, – 2015, v. 58(6), – p. 61-70.

имеющихся двух отдельных частных видах РСР – перерождающих и селективных в некоторой степени ограничиваются возможности моделирования, особенно при ветвлении процессов и при анализе цветовой достижимости, с целью преодоления которых представлена обобщенная модификация РСР².

Обобщенная РСР формально определяется как набор вида:

$$N_{GCPN} = (P, T, F, H, \Omega, \lambda, \varphi, \psi, \mu_0)$$

Где:

- P и T – соответственно конечные множества позиций и переходов: $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}$, $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots\}$

- F и H – соответственно функции инцидентности множеств позиций и переходов:

$$F : P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$H : T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

- Ω – непустое конечное множество цветов позиций и маркеров: $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$

- λ – функция распределения цветов по позициям сети:

$$\lambda : P \times \Omega \rightarrow \{0, 1\}$$

- φ – функция распределения цветов маркеров по входным позициям переходов сети:

$$\varphi : (P \times \Omega) \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

- ψ – функция распределения цветов маркеров по

² Мустафаев, В.А., Гусейнзаде, Ш.С. Разработка модели управления обрабатывающего центра с применением раскрашенных сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий, – 2018. – №3(165), – с. 36-44.

выходным позициям переходов сети:

$$\psi : T \times (P \times \Omega) \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

- μ_0 – начальное распределение маркеров по позициям:

$$\mu_0 : P \times \Omega \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

Функции φ и ψ задают законы срабатывания переходов и определяют распределение цветов маркеров по позициям сети.

Маркировка позиций сети представляется в виде матрицы размерности $|P| \times |\Omega|$, элементы которого составлены из чисел маркеров цвета ω в позиции p .

Алгоритм функционирования обобщенных РСП:

Начало алгоритма.

Шаг 1. Создание матрицы входных инцидентий $F = [f_{ij}]$, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$ (n -число позиций, m -число переходов). Элемент f_{ij} равен числу дуг от i -ой позиции к j -му переходу:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in \bullet t_j ; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 2. Создание матрицы выходных инцидентий $H = [h_{ji}]$, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$. Элемент h_{ji} равен числу дуг от j -го перехода к i -ой позиции:

$$h_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in t_j^* ; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 3. Создание матрицы начальной маркировки $\mu = [\mu_{il}]$, где $i = \overline{1, n}$, $l = \overline{1, k}$ (k - число цветов). Элемент μ_{il} равен числу маркеров цвета ω_l в позиции p_i .

Шаг 4. Создание матрицы распределения цветов по позициям $\lambda = [\lambda_{il}]$, где $i = \overline{1, n}$, $l = \overline{1, k}$:

$$\lambda_{il} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \times \omega_l \in \Omega; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 5. Создание матрицы распределения цветов маркеров по входным позициям переходов $\varphi = [\varphi_{jl}]$, ($j = \overline{1, m}$, $l = \overline{1, k}$):

$$\varphi_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\overline{\bullet t_j \times \omega_l}) \in \bullet C_i; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 6. Создание матрицы распределения цветов маркеров по выходным позициям переходов $\Psi = [\Psi_{jl}]$, ($j = \overline{1, m}$, $l = \overline{1, k}$):

$$\psi_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\overline{t_j \times \omega_l}) \in C_i^*; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 7. Поиск разрешенного перехода. Для каждого перехода t_j , $j = \overline{1, m}$ проверяется условие срабатывания:

7.1. из матрицы $F = [f_{ij}]$ определяются все выходные позиции $p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_z}$ перехода t_j , где $z = |\bullet t_j|$.

7.2. из матрицы φ определяются все доступные распределения цветов по выходным позициям t_j : $\omega_{l_1}, \omega_{l_2}, \dots, \omega_{l_r}$, $r \in [1, k]$;

7.3. из матрицы μ выбираются числа определенного цвета маркеров во всех имеющихся выходных позициях перехода t_j :

$$\mu_{i_z l_r} = (p_{i_z}, \omega_{l_r}), \quad z = \overline{1, |\bullet t_j|}, r = \overline{1, k};$$

Если для $\forall i_z$ существует $\exists l_r$ что, $\mu_{i_z l_r} \geq f_{i_z j}$, тогда переход t_j разрешен и выполняется переход к шагу 9.

Шаг 8. Если для перехода t_j условие срабатывания не выполняется, то индекс j увеличивается на единицу: $j = j + 1$. Если $j \leq m$ то осуществляется переход к пункту 7.1., в противном случае сообщается о тупиковом состоянии и

осуществляют переход к концу алгоритма.

Шаг 9. Вычисление элементов матрицы μ' :

$$\mu_{il}' = \mu_{il} + \varphi_{ji} * f_{ij} - \psi_{jl} * h_{ji}$$

где $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$; $l = \overline{1, k}$;

Шаг 10. По выбору пользователя процесс завершают (осуществляют переход к концу алгоритма) или продолжают до получения искомой маркировки (переход к шагу 7).

Конец алгоритма.

Модель управления модуля механообработки в гибкой производственной системе с применением обобщенной РСП. Рассматривается типовой обрабатывающий центр механообработки, состоящий одного промышленного робота, одного персонального входного накопителя, двух однотипных устройств для выполнения одинаковой операции над разными однотипными заготовками и из одного персонального выходного накопителя. Связь модуля с предыдущим и последующим модулями происходит соответственно с помощью вышеуказанных накопителей. На модуле обрабатываются одного типа детали. Заготовки поступают на персональный входной накопитель и ожидают обработку. Свободное устройство 1 или устройство 2 захватывает заготовку из входного накопителя. Если оба устройства свободны то, между ними появляется конфликтная ситуация. Конфликт разрешается случайным выбором одного устройства и частичным параллелированием, чередуя их. Обработанные детали поступают на выходной накопитель и ожидают отправку к последующему модулю.

Возможные состояния модуля описываются позициями: P_1 – робот свободен; P_2 – во входном накопителе имеются заготовки; P_3 – робот захватил заготовку; P_4 – устройство 1 свободно; P_5 – устройство 2 свободно; P_6 – заготовка находится в рабочей зоне устройства 1; P_7 – заготовка находится в рабочей зоне устройства 2; P_8 – устройство 1 обрабатывает заготовку; P_9 – устройство 2 обрабатывает заготовку; P_{10} – в устройстве 1 заготовка обработана; P_{11} – в устройстве 2 заготовка обработана;

P_{12} – робот захватил обработанную деталь; P_{13} – деталь находится в выходном накопителе.

Возможные события описываются переходами: t_1 – робот захватывает заготовку из входного накопителя; t_2 – робот вставляет заготовку в устройство1; t_3 – робот вставляет заготовку в устройство2; t_4 – начинается обработка заготовки в устройстве1; t_5 – начинается обработка заготовки в устройстве2; t_6 – заканчивается обработка заготовки в устройстве1; t_7 – заканчивается обработка заготовки в устройстве2; t_8 – робот захватывает деталь из устройства1; t_9 – робот захватывает деталь из устройства2; t_{10} – робот вставляет деталь в выходной накопитель.

Используя логику «If-Then» отношения между событиями и состояниями описаны продукциями:

if p_1 and p_2 then t_1 ;	if p_7 then t_5 ;	if p_{10} and p_1 then t_8 ;
if t_1 then p_3 ;	if t_4 then p_8 ;	if p_{11} and p_1 then t_9 ;
if p_3 and p_4 then t_2 ;	if t_5 then p_9 ;	if t_8 then p_{12} ;
if p_3 and p_5 then t_3 ;	if p_8 then t_6 ;	if t_9 then p_{12} ;
if t_2 then p_1 and p_6 ;	if p_9 then t_7 ;	if p_{12} then t_{10} ;
if t_3 then p_1 and p_7 ;	if t_6 then p_4 and p_{10} ;	if t_{10} then p_1 and p_{13} .
if p_6 then t_4 ;	if t_7 then p_5 and p_{11} ;	

Функция инцидентности множества позиций представляется матрицей $F(13,10)$:

$$F(13,10) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Функция инцидентности множества переходов представляется матрицей $H(10,13)$:

$$H(10,13) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Распределения цветов маркеров по входным и выходным позициям переходов представляется матрицами:

$$\varphi(10,5) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \psi(10,5) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В представленной модели обобщенной РСР используются следующие описания множества цветов и переменных:

– Множество цветов маркеров: $C = \{r$ (робот), $u1$ (устройство 1), $u2$ (устройство 2), z (заготовка), d (деталь)};

– Множество цветов позиций: $w1$ (с разрешением помещения маркеров цвета r (робот)); $w2$ (с разрешением помещения маркеров цвета $u1$ (устройство 1)); $w3$ (с разрешением помещения маркеров цвета $u2$ (устройство 2)); $w4$ (с разрешением помещения маркеров цвета z (заготовка)); $w5$ (с разрешением помещения маркеров цвета d (деталь));

разрешением помещения маркеров цвета d (деталь));

– Множество цветов дуг: x1 (с разрешением перемещения маркеров цвета r); x2 (с разрешением перемещения маркеров цвета u1); x3 (с разрешением перемещения маркеров цвета u2); x4 (с разрешением перемещения маркеров цвета z); x5 (с разрешением перемещения маркеров цвета d).

Распределение цветов по позициям сети и начальная маркировка представляются матрицами $\lambda(13,5)$ и $\mu_0(13,5)$:

$$\lambda(13,5) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mu_0(13,5) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Программная реализация, визуализация (рисунок1) и анализ модели выполнены с применением инструментальной системы CPN Tools. По вышеуказанным начальным данным проведены компьютерные эксперименты симуляции сети, устранением ошибок проектирования, дефектов дизайна выбрана оптимальная траектория, игнорирующая случайных задержек при симуляции модели. В начальной маркировке разрешен один переход t_1 (робот захватывает заготовку из входного накопителя), который размечен. Во втором шаге конфликтуют переходы t_2 и t_3 . В данном случае конфликт разрешается не приоритетом, а случайным выбором перехода t_2 или t_3 . Семантика выполнения параллельных событий является интерливинговой.

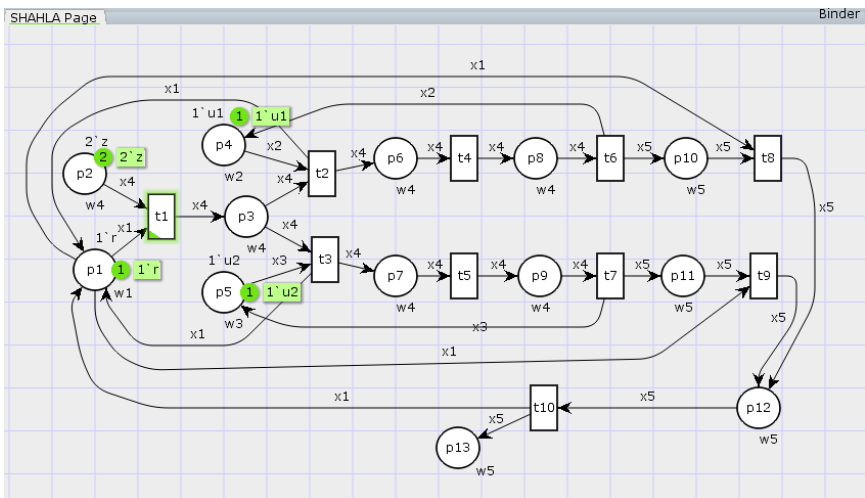


Рисунок 1. Граф модель РСР модуля ГПС

При 1-ом и 2-ом шагах симуляции получены матрицы маркировок $\mu_1(13,5)$ и $\mu_2(13,5)$:

$$\Rightarrow t_1 \Rightarrow \mu_1(13,5) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow t_2 \Rightarrow \mu_2(13,5) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow t_1 \Rightarrow$$

При продолжении симуляции все переходы сети выполняются, что означает живости модели и

последовательность запусков срабатываемых переходов принимает вид: $\delta = (t_1, t_2, t_1, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_{10}, t_9, t_{10})$

Модель проанализирована, сеть жива, периодична и все маркировки достижимы.

Модель эволюционного нечеткого регулятора с применением РСП в системе CPN Tools. Основным моментом при реализации эволюционного нечеткого регулятора (НР) является сопряжение локально параллельного алгоритма нечеткого регулирования с эволюционной процедурой. Принятые заведомо неверные решения могут проявиться в момент испытания работоспособности регулятора. Одним из основных требований к регуляторам при автоматическом управлении является обеспечение устойчивости, в связи с обеспечением безопасности³.

Структура локально-параллельного эволюционного нечеткого регулятора состоит из следующих блоков: управляющее устройство (УУ), объект управления (ОУ), датчик регистрации (ДР), преобразователь входного сигнала из четкой формы в нечеткую (ЧН) (fuzzifier), блок нечеткой обработки (НО) (fuzzy inference engine), преобразователь выходного сигнала из нечеткой формы в четкую (НЧ) (defuzzifier), блок оценки качества (ОК), регистрация результатов (РР), блок методов изменения параметров (ИП), блок лучших вариантов (ЛВ) (Рисунок 2). Блоки эволюционного нечеткого регулятора в роли состояний описаны позициями РСП:

$$P = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10})$$

Где p_1 – блок УУ, p_2 – блок ОУ, p_3 – блок ДР, p_4 – блок ЧН, p_5 – блок НО, p_6 – блок НЧ, p_7 – блок ОК, p_8 – блок РР, p_9 – блок ИП, p_{10} – блок ЛВ.

³ Бураков, М.Б. Коновалов, А.С., Яковец, О.Б. Эволюционный синтез нечетких регуляторов. // – Санкт-Петербург: Информационно управляющие системы, – 2015. №6, – с. 28-33.

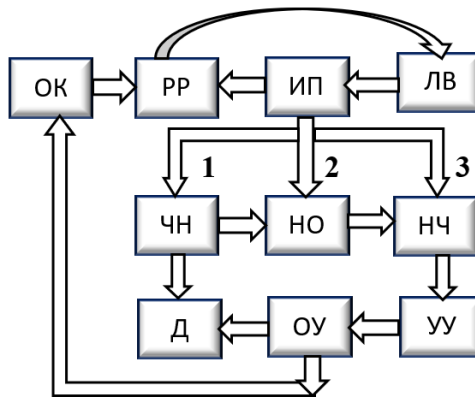


Рисунок 2. Блок-схема эволюционного нечеткого регулятора

События между состояниями обозначены переходами⁴:

$$T = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14})$$

Где t_1 – регулирование входных параметров, t_2 – регистрация входных параметров, t_3 – преобразование входного сигнала из четкой формы в нечеткую, t_4 – нечеткая обработка, t_5 – преобразование выходного сигнала из нечеткой формы в четкую, t_6 – формирование соответствующего управляющего воздействия для входного параметра, t_7 – изменение профиля ФП входных термов ЛгП, t_8 – изменение профиля ФП выходных термов ЛгП, t_9 – изменение решающих правил, t_{10} – независимое наблюдение за работой системы, t_{11} – определение целевых характеристик функционирования системы, t_{12} – накопление опыта для каждого варианта ИП, t_{13} – отбор лучших вариантов изменений параметров, t_{14} – установка наилучших изменений параметров. Построены матрицы входной и выходной инцидентности $F(10,14)$ и $H(14,10)$, на основе которых разработана граф-модель эволюционного нечеткого регулятора в системе CPN Tools (рисунок 3.).

⁴ Гусейнзаде, Ш.С. Анализ свойства устойчивости эволюционного нечеткого регулятора с применением сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий, – 2019. – №8, – с. 15-22.

Начальная маркировка μ_0 представляется вектором:

$$\mu_0(10) = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$$

Во время симуляции графа при каждом срабатывании переходов происходят изменения векторов маркировки графа

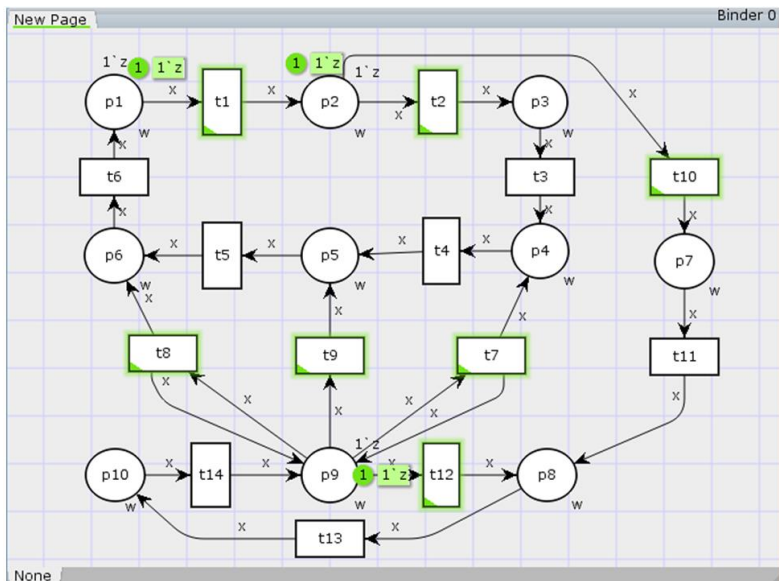


Рисунок 3. Модель эволюционного нечеткого регулятора на CPN Tools

Последовательность запусков срабатываемых переходов и отраженные в векторах изменения маркировки описаны в таблице (Таблица 1).

Таблица 1. Сработанные переходы и изменения маркировки

Переход	Изменения маркировки	Переход	Изменения маркировки
	$\mu_0 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$;	t12	$\mu_{23} = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 1)$;
t1	$\mu_1 = (0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$;	t14	$\mu_{24} = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0)$;

t ₂	$\mu_2=(0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0);$	t ₄	$\mu_{25}=(0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₃	$\mu_3=(0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0);$	t ₅	$\mu_{26}=(0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₁₀	$\mu_4=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0);$	t ₆	$\mu_{27}=(1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₁₁	$\mu_5=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₉	$\mu_{28}=(1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₁₃	$\mu_6=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1);$	t ₅	$\mu_{29}=(1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₁₂	$\mu_7=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1);$	t ₆	$\mu_{30}=(2\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₁₄	$\mu_8=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁	$\mu_{31}=(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₄	$\mu_9=(0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁	$\mu_{32}=(0\ 2\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₅	$\mu_{10}=(0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₂	$\mu_{33}=(0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₆	$\mu_{11}=(1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₃	$\mu_{34}=(0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0);$
t ₇	$\mu_{12}=(1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁₀	$\mu_{35}=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 2\ 1\ 0);$
t ₄	$\mu_{13}=(1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁₁	$\mu_{36}=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 3\ 1\ 0);$
t ₅	$\mu_{14}=(1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁₃	$\mu_{37}=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 1);$
t ₆	$\mu_{15}=(2\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁₂	$\mu_{38}=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 3\ 0\ 1);$
t ₁	$\mu_{16}=(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₁₄	$\mu_{39}=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 3\ 1\ 0);$
t ₁	$\mu_{17}=(0\ 2\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₄	$\mu_{40}=(0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 3\ 1\ 0);$
t ₂	$\mu_{18}=(0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₅	$\mu_{41}=(0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 3\ 1\ 0);$
t ₃	$\mu_{19}=(0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0);$	t ₆	$\mu_{42}=(1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 3\ 1\ 0);$
t ₁₀	$\mu_{20}=(0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0);$	t ₈	$\mu_{43}=(1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 3\ 1\ 0);$

	0);		0);
t_{11}	$\mu_{21}=(0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1$ 0);	t_6	$\mu_{44}=(2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 1$ 0);
t_{13}	$\mu_{22}=(0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1$ 1);	t_1	$\mu_{45}=(1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 1$ 0).

Модель исследована на основе полученных результатов при симуляции сети. Последовательность запусков срабатываемых переходов имеет вид: $t_1, t_2, t_3, t_{10}, t_{11}, t_{13}, t_{12}, t_{14}, t_4, t_5, t_6, t_7, t_4, t_5, t_6, t_1, t_1, t_2, t_3, t_{10}, t_{11}, t_{13}, t_{12}, t_{14}, t_4, t_5, t_6, t_9, t_5, t_6, t_6, t_1, t_2, t_3, t_{10}, t_{11}, t_{13}, t_{12}, t_{14}, t_4, t_5, t_6, t_8, t_6, t_1$. По картежу выполняемых переходов видно, что данная РСП не имеет тупиков, так как все переходы были запущены. Задача достижимости для данной РСП тоже решена, все переходы выполняются за 45 шагов, и СП приводится в начальное состояние, что показывает устойчивость системы "в целом". Исключением является маркировка в позиции p_8 , где накапливаются зарегистрированные результаты лучших вариантов с применением методов изменения параметров.

Третья глава посвящена к разработке комбинированных и интегрированных модификаций, предназначенных моделированию нечеткого управления на основе НСП. Определено, что существующие НСП все еще сталкиваются с трудностями, чтобы имитировать непоследовательное познание экспертов и индивидуальные особенности различных систем.

Математическая формализация интегрированных НРСП. Предложена интегрированная модификация НРСП, получаемая путем интеграции НСП и РСП. Выявлены и обоснованы в отдельности недостатки, преимущества НСП и РСП при моделировании интеллектуальных моделей управления. В разработанной НРСП функции принадлежности термов лингвистической переменной применены к маркерам РСП в роле цвета, дугам присваиваются нечеткие условия существования и переходам присвоены нечеткие условия срабатывания. Выбор функции принадлежности и фазсификация значений термов выполняется в приложении

Fuzzy Toolbox системы Matlab. Структура организована в системе CPN TOOLS с синхронизацией языка CPN ML с пакетом MATLAB. Разработана модель автоматизации адаптивного нечеткого управления процессом включения и отключения водяных насосов соответственно уровням воды в насосном колодце на основе интегрированных НРСП.

НРСП представляется как набор непустых конечных множеств и функций⁵:

$$FCPN = (P, T, F, H, L, \Upsilon, \Omega, \Sigma, \lambda, \varphi, \psi, \tilde{R}, \tilde{\Delta}, \tilde{G}, \mu^0)$$

Где:

- P и T – соответственно конечные множества позиций и переходов:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}, T = \{t_1, t_2, t_3, \dots\};$$

- F и H – соответственно функции инцидентности множеств позиций и переходов:

$$F : P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$H : T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

- L – конечное множество лингвистических переменных:

$$L = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots\}$$

- Υ – множество цветов позиций и цветов маркеров:

$$\Upsilon = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots\}$$

- Ω – множество цветов позиций и цветов маркеров:

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$$

- Σ – конечное множество переменных, присвоенных к дугам:

⁵ Гусейзаде, Ш.С., Моделирование интеллектуальных систем управления с применением модифицированных нечетких раскрашенных сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – №10, – с. 30-37.

$$\Sigma = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots\}$$

- λ – функция распределения цветов по позициям:

$$\lambda : P \times \Upsilon \rightarrow \{0, 1\}$$

- φ – функция распределения цветов маркеров по позициям:

$$\varphi : P \times \Omega \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

- ψ – функция разрешения движения цветов маркеров по дугам:

$$\psi : P \times \Sigma \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

- \tilde{R} – конечное множество нечетких предикатов, отнесенных к переходам, определяющих дополнительные условия выполнения переходов:

$$\tilde{R} = \{\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \tilde{r}_3, \dots\}$$

- $\tilde{\Delta}$ – конечное множество нечетких условий, отнесенных к дугам, определяющих существование дуги:

$$\tilde{\Delta} = \{\tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2, \tilde{\sigma}_3, \dots\}$$

- \tilde{G} – множество нечетких функций цвета маркеров, определяющих нечетких значений термов лингвистических переменных:

$$\tilde{G} = \{\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \tilde{g}_3, \dots\}$$

- $\tilde{\mu}_0$ – начальное распределение маркеров по позициям:

$$\tilde{\mu}_0 : P \times (\Omega \cup \tilde{G}) \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

В представленной модифицированной НРСП лингвистической переменной соответствует одна позиция, а каждому терму определен цвет маркера, чем число позиций уменьшается до число лингвистических переменных m , что приводит к сжатию модельного пространства, а увеличение числа цветов маркеров не влияет на размер структурных элементов.

Модель автоматизации адаптивного нечеткого управления на основе интегрированных НРСП. В качестве примера рассматривается модель управления тремя водяными насосами на водяном колодце для сточных вод.

Лингвистическая переменная «уровень воды» («water level») определяется в универсуме $U = [0,12]$ (условная единица) и имеет терм множество $T = \{\text{«сильно понижен»}, \text{«понижен»}, \text{«слегка понижен»}, \text{«нормальный»}, \text{«слегка повышен»}, \text{«повышен»}, \text{«сильно повышен»}\}$. Для лингвистической переменной «уровень воды» в универсуме U построены семь нечетких множеств (рисунок 4):

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 &= (0, 1.8), \tilde{A}_2 = (0.2, 3.8), \tilde{A}_3 = (2.2, 5.8) \\ \tilde{A}_4 &= (4.2, 7.8), \tilde{A}_5 = (6.2, 9.8) \\ \tilde{A}_6 &= (8.2, 11.8), \tilde{A}_7 = (10.2, 12) \end{aligned}$$

Соответственно значениям терм множества, построенным функциям принадлежности присвоены названия – “hd”, “d”, “sd”, “nor”, “si”, “i”, “hi” (“hd” – сильно понижен (highly decreased), “d” – понижен (decreased), “sd” – слегка понижен (slightly decreased), “nor” – нормальный (normal), “si” – слегка повышен (slightly increased), “i” – повышен (increased), “hi” – сильно повышен (highly increased)).

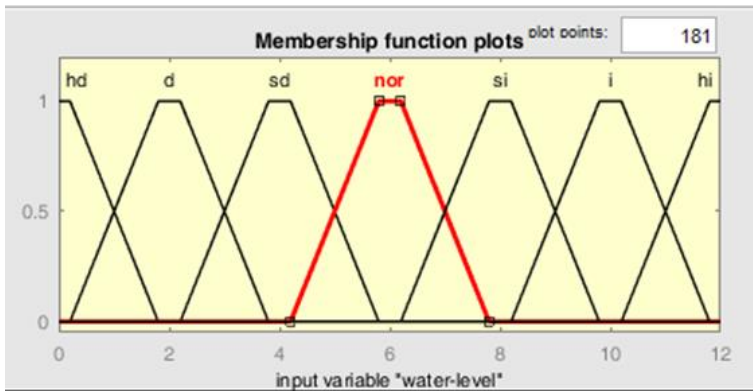


Рисунок 4. Графическое представление функций принадлежности для лингвистической переменной «уровень воды».

Опираясь на критерии работы трёх водяных насосов соответственно уровням воды в насосном колодце в зависимости от всевозможных состояний и событий в системе определяются структурные элементы:

- Множество позиций:

$$P = \{WLC, OF1, OF2, OF3, ON1, ON2, ON3\}$$

Где, WLC (water level condition) — прием информации о состоянии уровня воды; OF1 — отключен первый насос; OF2 — отключен второй насос; OF3 — отключен третий насос; ON1 — включен первый насос; ON2 — включен второй насос; ON3 — включен третий насос.

- Множество переходов:

$$T = \{TON1, TON2, TON3, TOF1, TOF2, TOF3\}$$

Где, TON1 — включение первого насоса; TON2 — включение второго насоса; TON3 — включение третьего насоса; TOF1 — отключение первого насоса; TOF2 — отключение второго насоса; TOF3 — отключение третьего насоса⁶.

- Множество дуг: Все соединения между позициями и переходами модели входят в множество дуг.

Алгоритм функционирования ОУ описан продукциями, на основе которого сформированы матрицы входных и выходных инцидентностей $F(7,6)$ и $H(6,7)$:

⁶ Huseynzade, Sh.S. Automation Model of the Adaptive Control on Petri nets // – Kyiv: Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv, a series of physical and mathematical sciences, – 2018. №1, – p. 55-59.

$$F(7,6) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad H(6,7) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Модель разработан в программно-инструментальной системе на CPN Tools (рисунок 5). Стандартная декларация с помощью CPN ML определяет: цветов позиций (WL, POF, PON), цветов маркеров (pof, pon, si, i, hi, nor, sd, d, hd) и переменных присвоенных дугам (w, f, p).

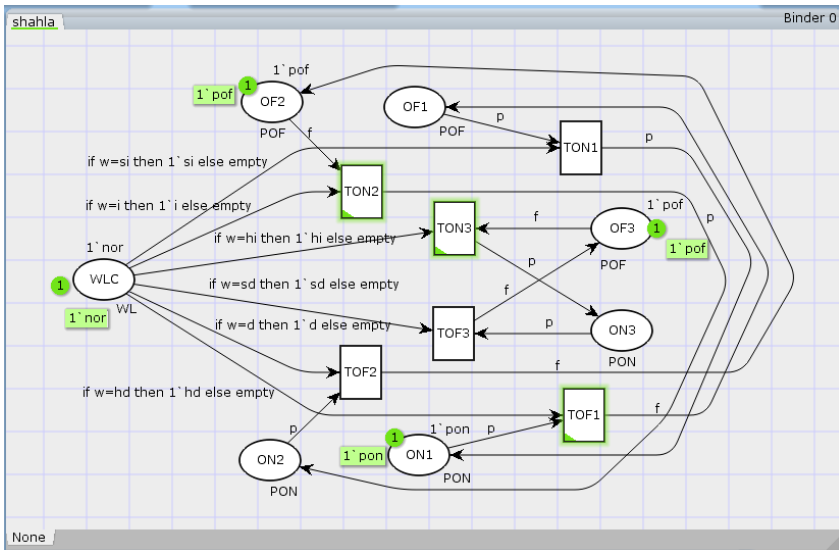


Рисунок 5. Модель НРСЦ в системе CPN Tools

Начальная маркировка, соответствующая состоянию системы, на представленной графе модели (рисунок 5), учитывая последовательность $WLC, OF1, OF2, OF3, ON1, ON2, ON3$ позиций будет иметь вид:

$$\mu^0 = \{nor, \varepsilon, pof, pof, pon, \varepsilon, \varepsilon\}$$

Которая соответствует ситуации: состояние относительно уровня воды нормальное, первый насос включен, второй и третий насосы отключены.

Условия существования присвоены дугам в виде кодового выражения на языке CPN ML:

If $w=si$ then $l'si$ else empty; – (если во входной позиции имеется маркер “*si*”, соответствующий ситуации слегка повышен (slightly increased) тогда по дуге выполняется передача одного маркера “*si*”, в противном случае дуга отсутствует);

If $w=i$ then $l'i$ else empty;

If $w=hi$ then $l'hi$ else empty;

If $w=sd$ then $l'sd$ else empty;

If $w=d$ then $l'd$ else empty;

If $w=hd$ then $l'hd$ else empty;

Цвета для маркеров сети: маркеры “*hd*”, “*d*”, “*sd*”, “*nor*”, “*si*”, “*i*”, “*hi*” выражают значений термов; маркеры “*pof*”, “*pon*” означают отключенное и включенное состояния насосов.

Цвета для дуг сети: w – разрешение движения маркеров цвета “*hd*”, “*d*”, “*sd*”, “*nor*”, “*si*”, “*i*”, “*hi*” по дуге; f – разрешение движения маркеров цвета “*pof*” по дуге; p – разрешение движения маркеров цвета “*pon*” по дуге.

Цвета для позиций сети: WL , POF , PON . WL – разрешение существования маркеров цвета “*hd*”, “*d*”, “*sd*”, “*nor*”, “*si*”, “*i*”, “*hi*” в позиции; POF и PON – разрешение существования маркеров цвета “*pof*” и “*pon*” в позиции.

По вышеуказанным начальным данным проведены компьютерные эксперименты симуляции сети. На основе входящих информации автоматически принимается решение для нормализации ситуации. Соответственно ситуациям формируются маркировки:

$$\mu^1 = \{i, \varepsilon, pof, pof, pon, \varepsilon, \varepsilon\}$$

$$\mu^2 = \{nor, \varepsilon, \varepsilon, pof, pon, pon, \varepsilon\} \text{ и т.д.}$$

Полученные результаты экспериментов по разным входящим информациям дают возможностей анализа модели свойствами НРСП. При симуляции демонстрируется скоростная адаптация системы к ситуации.

Моделирование с применением комбинированных НСП. Представлена комбинированная модификация расширенных НСП видов, где переходам присвоены функции принадлежности нечеткого срабатывания и нечеткого порога срабатывания переходов, и где позициям присвоены функции принадлежности наличия одного маркера в соответствующей позиции. Разработан алгоритм функционирования представленной модификации, которая позволяет моделированию с применением нечетких продукционных правил, описывающих ОУ. Основные части продукционных правил представлены в виде структурных элементов комбинированной модифицированной НСП. Разработана нечеткая модель производственного модуля в виде НСП на основе нечеткой продукционной системы. Осуществлена компьютерная реализация модели и выполнен анализ сети.

Представленная модификация НСП имеет вид:

$$N_{cf} = (P, T, I, O, f, \lambda, \mu^0)$$

где \tilde{P} и \tilde{T} – нечеткие множества позиций и переходов; $I: \tilde{P} \times \tilde{T} \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ и $O: \tilde{P} \times \tilde{T} \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ – соответственно функции входных и выходных инцидентий; $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$, $f_j \in [0, 1]$, $m \in N$, $j = \overline{1, m}$ (m – число переходов) – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, $\lambda_j \in [0, 1]$, $m \in N$, $j = \overline{1, m}$ – вектор значений порога срабатывания переходов; $\mu^0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_n^0)$ (n – число позиций) – вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности наличия одного маркера в соответствующей позиции данной сети, при этом $\mu_i^0 \in [0, 1]$, $i = \overline{1, n}$.

Алгоритм функционирования комбинированной модификации НСП:

Шаг 1. Создание матрицы входных инциденций $g = \{g_{ij}\}$, где $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

Шаг 2. Создание матрицы выходных инциденций $h = \{h_{ji}\}$, где $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

Шаг 3. Создание вектора начальной маркировки $\mu = \{\mu_i\}$, где $i = \overline{1, n}$ каждая компонента μ_i определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующей позиции данной сети.

Шаг 4. Создание вектора $\lambda = \{\lambda_j\}$, где $j = \overline{1, m}$ и каждая компонента определяется пороговым значением срабатывания перехода t_j .

Шаг 5. Создание вектора $f = \{f_j\}$, где $j = \overline{1, m}$ и каждая компонента f_j определяется значением функции принадлежности нечеткого срабатывания перехода t_j .

Шаг 6. Создание вектора $c = \{c_i\}$, где $i = \overline{1, n}$ и компоненты C_i используется для фиксации номеров входных и выходных позиций разрешенного перехода.

Шаг 7. Поиск разрешенного перехода. Переход t_j разрешен, если для минимальной значения функции принадлежностей нечеткого наличия одного маркера входных позиций удовлетворяется условие – $\min\{\mu_i\} \geq \lambda_j$:

а) определяется счетчик k (начальное значение $k=0$), для счета числа входных позиций t_j ;

б) для каждого $g_{ij} \neq 0$ при $i = \overline{1, n}$ счетчик прибавляется на единицу и номер позиции фиксируется: $k=k+1, c_k = i$;

в) $\mu_{min} = \mu_i$, где $i=c_1$ (μ_{min} – идентификатор для присвоения минимального значения функции принадлежностей входных позиций t_j);

д) если $\mu_i < \mu_{min}$ то $\mu_{min} = \mu_i$ для всех $i=c_l, l=\overline{2, k}$;

е) если $\mu_{min} \geq \lambda_j$ то переход t_j разрешен, осуществляется переход к шагу 9.

Шаг 8. Если для перехода t_j условие срабатывания не выполняется, то индекс j увеличивается на единицу: $j=j+1$. При $j \leq n$ осуществляется переход к пункту а) шага 7, в противном случае вывод сообщения о тупиковом состоянии и завершении поиска, осуществляется переход к шагу 11.

Шаг 9. Формирование вектора следующей маркировки $\mu' = (\mu'_1, \mu'_2, \dots, \mu'_n)$: после срабатывания перехода t_j .

9.1. Для всех фиксированных входных позиций перехода t_j значения функций принадлежности нечеткого наличия одного маркера равняются нулю: $\mu'_i = 0$, где $i=c_l, l=\overline{1, k}$.

9.2. Вычисление значений функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера выходных позиций:

а) определяется счетчик k (начальное значение $k=0$), для счета числа выходных позиций t_j :

б) для каждого $h_{ji} \neq 0$ при $i = \overline{1, n}$, счетчик прибавляется на единицу и номер позиции фиксируется: $k=k+1, c_k = i$;

в) $\mu_{max} = \mu_i$, где $i=c_1$ (μ_{max} – идентификатор для присвоения максимального значения функции принадлежности выходных позиций t_j);

д) если $\mu_i > \mu_{max}$ то $\mu_{max} = \mu_i$. для всех $i=c_l, l=\overline{2, k}$;

е) если $\mu_{min} > f_j$ то $\mu_{min} = f_j$;

ф) если $\mu_{max} < \mu_{min}$ то $\mu_{max} = \mu_{min}$;

г) для всех фиксированных выходных позиций перехода t_j значения функций принадлежности нечеткого наличия одного маркера вычисляются по правилу: $\mu'_i = \mu_{max}$, где $i=c_l, l=\overline{1, k}$.

Шаг 10. По выбору процесс завершается (осуществляется переход к шагу 11) или продолжается (осуществляется переход к шагу 7).

Шаг 11. Конец.

Модель системы контроля производственного модуля с применением комбинированной НСП. На примере модуля вскрытия цилиндрического отверстия участка образования канала алюминиевых испарителей, сформированы нечеткие

производственные правила. Образование канала алюминиевых испарителей выполняется по следующей технологии: полуфабрикат алюминиевого испарителя из предыдущей позиции автоматической транспортной системой 1 перемещается к позиции подъемно–позиционирующего манипулятора 1 промышленного робота; после позиционирования полуфабриката промышленный робот перемещает его к позиции подъемно–позиционирующего манипулятора 2 устройства вскрытия цилиндрического отверстия; включается устройство вскрытия цилиндрического отверстия и на специальном приспособлении выполняется операция вскрытия цилиндрического отверстия; по окончании операции промышленный робот захватывает полуфабрикат и перемещает его к позиции автоматической транспортной системой 2, который доставляет заготовку к позиции гидропресса, снабженного специальными штампами, где выполняется операция образования канала. Далее процесс повторяется в циклическом режиме по мере поступления полуфабриката из предыдущей позиции⁷.

Известно, что высота цилиндрического отверстия (ВЦО) должна быть в пределах 10 ± 2 мм, а диаметр поперечного сечения цилиндрического отверстия (ДПС) – $4 \pm 0,5$ мм. Система нечетких производственных правил (ПФ– полуфабрикат):

Правило 1. Если ВЦО чуть выше нормальной (p_4) и ДПС чуть выше нормального (p_5), тогда ПФ нормальный (p_3).

Правило 2. Если ВЦО выше нормальной (p_8) и ДПС выше нормального (p_9), тогда ПФ принят в систему контроля (p_{12}).

Правило 3. Если ВЦО намного выше нормальной (p_{13}) и ДПС намного выше нормального (p_{14}), тогда ПФ не принят в систему контроля (p_{17}).

⁷ Мустафаев, В.А., Гусейнзаде, Ш.С., Джафарова, Ш.М. Анализ производственных моделей динамических взаимодействующих процессов с применением модифицированных нечетких сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий, – 2017. №2(146), – с. 21-25.

Правило 4. Если ВЦО нормальная (p_1) и ДПС нормальный (p_2), тогда ПФ нормальный (p_3).

Правило 5. Если ВЦО чуть ниже нормальной (p_6) и ДПС чуть ниже нормального (p_7), тогда ПФ нормальный (p_3).

Правило 6. Если ВЦО ниже нормальной (p_{10}) и ДПС ниже нормального (p_{11}), тогда ПФ принят в систему контроля (p_{12}).

Правило 7. Если ВЦО намного ниже нормальной (p_{15}) и ДПС намного ниже нормального (p_{16}), тогда ПФ не принят в систему контроля (p_{17}).

Правило 8. Если ПФ принят в систему контроля (p_{12}), тогда ПФ нормальный (p_3) или ПФ бракованный (p_{18}).

Правило 9. Если ПФ не принят в систему контроля (p_{17}), тогда ПФ бракованный (p_{18}).

Все условия и заключения правил нечетких продукций определяются как позиции МНСП:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17}, p_{18}\}$$

В соответствии правилам нечетких продукций определяются переходы: $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9\}$

Векторы значений функции принадлежности нечеткого срабатывания, порога и начальной маркировки переходов определены по статическим данным:

$$f = (0.8; 0.7; 0.6; 0.5; 0.4; 0.3; 0.2; 0.2; 0.1)$$

$$\lambda = (0.8; 0.7; 0.6; 0.5; 0.4; 0.3; 0.2; 0.2; 0.1)$$

$$\mu_0 = (0.9; 0.9; 0; 0.8; 0.8; 0.7; 0.7; 0.6; 0.6; 0.5; 0.5; 0; 0.4; 0.4; 0.3; 0.3; 0; 0)$$

При компьютерной реализации разработанного алгоритма получены векторы достижимых маркировок:

– Первым разрешимым переходом является t_1 , так как $I(t_1) = \{p_1, p_2\}$, $\mu_1^0 = 0.9 > 0$, $\mu_2^0 = 0.9 > 0$ и выполняется условие $\min\{\mu_1^0, \mu_2^0\} \geq \lambda_1$ ($\min\{0.9, 0.9\} \geq 0.8$). Срабатывает переход t_1 . Для входных p_1, p_2 и выходной p_3 позиций вычисляются компоненты маркировки: $\mu_1^1 = 0$, $\mu_2^1 = 0$,

$$\begin{aligned}\mu_3^1 &= \max\{\mu_0(p_3), \min(0.9, f_1)\} = \max\{0; \min(0.9; 0.8)\} = \\ &= \max\{0; 0.8\} = 0.8\end{aligned}$$

Маркировка $\mu^1 = (\mu_1^1, \mu_2^1, \dots, \mu_{18}^1)$ имеет вид:

$$\mu^1 = (0; 0; 0.8; 0.8; 0.8; 0.7; 0.7; 0.6; 0.6; 0.5; 0.5; 0; 0.4; 0.4; 0.3; 0.3; 0; 0)$$

Срабатывают последовательно переходы $t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9$. Получены соответствующие. Поведение моделируемой системы анализируется базовыми свойствами СП.

Комбинированная модификация НСП обеспечивает: наглядное представление структуры правил нечетких продукций и выполнение на их основе нечетких логических выводов.

Комбинированная расширенная модификация ССП. сформирована комбинированная ССП, в которой стохастические параметры одновременно применены к двум структурным элементам одновременно – переходам и маркерам в позициях на основе представленных типов ССП. Модификация сформирована как нижеследующая:

Комбинированная модификация ССП определяется пятеркой $N_S^I = (P, T, W, \Omega, \mu^s)$, где, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n > 0$ – конечное непустое множество позиций; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m > 0$ – конечное непустое множество переходов; $W: (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow N$ – функция весов дуг между местами и переходами и наоборот (N – множество натуральных чисел); $I: P \times T \rightarrow (0, 1, \dots)$; $O: T \times P \rightarrow (0, 1, \dots)$ – соответственно функции входных и выходных вмешательств, $\Omega: T \rightarrow IR_+$ – функция темпов переходов ($IR_+ =]0; \infty[$ – непрерывная временная шкала), а отображение $\mu^s: P \rightarrow V_s = [0, 1]$ присваивает каждой позиции вектор распределения вероятностей наличия фишек $\mu^s(p_i)$.

Алгоритм функционирования комбинированной ССП:

Шаг 1. Создание матрицы входных и выходных инцидентов и темпов переходов $F = \{h_{ij}\}$, $H = \{h_{ji}\}$, $\Omega = \{\theta_j\}$, где $i = 1, n$, $j = 1, m$.

Шаг 2. Создание начальной маркировки $\mu = \{\mu_i\}$, $i = \overline{1, n}$,

Шаг 3. Определение матрицы $S=\{s_c\}$, где $c=\overline{0,m}$ для фиксации номеров разрешенных переходов.

Шаг 4. Поиск разрешенного перехода:

а) выбираются все $f_{ij} \neq 0$, при $i = \overline{1,n}$;

б) для каждого фиксированного i должен быть $\exists \mu_i \neq 0$.

Шаг 5. Если для перехода t_j условие срабатывания выполняется фиксируется номер этого разрешенного перехода: $c=c+1$; $s_c=j$;

Шаг 6. Индекс j увеличивается на единицу: $j=j+1$. При $j \leq m$ осуществляется переход к пункту а) шага 4, в противном случае если $c=0$, то выводится сообщение о тупиковом состоянии, завершается поиск и осуществляется переход к пункту 13.

Шаг 7. Выбор перехода t_j с наибольшим темпом θ_j среди фиксированных переходов, при $j=s_i$, где $i = \overline{1,c}$;

Шаг 8. Вычисление вероятности срабатывания разрешенного перехода t_j в маркировке μ_i : $PF(t_j) = \theta_j / \sum_{i=1}^c \theta_{s_i}$

Шаг 9. Вычисление среднего времени пребывания в маркировке μ_i : $SJ(t_j) = 1 / \sum_{i=1}^c \theta_{s_i}$

Шаг 10. Формирование вектора распределения вероятностей каждой входной позиции после срабатывания перехода t_j : $\mu'_i = \mu_i - f_{ij}$;

Шаг 11. Формирование вектора распределения вероятностей каждой выходной позиции после срабатывания перехода: $\mu'_i = \mu_i + h_{ji}$;

Шаг 12. По выбору пользователя или процесс продолжается и осуществляется переход к шагу 5, или процесс останавливается и осуществляется переход к шагу 13.

Шаг 13. Конец.

Интегрированная РССП является комбинацией раскрашенных и стохастических СП. Для получения структуры

РССП, необходимо добавить в ССП компонентов РСР: S – функция цвета маркера, определяющая в данном случае цвета каждого из маркеров $M(p_i)$ для позиций сети; V – условия срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера; K – емкость маркеров в позициях с учетом S . В интегрированной РССП к отдельным структурным элементам можно присвоить цветовые атрибуты как в РСР и накладывать стохастические параметры, логические условия для срабатывания переходов как в ССП.

Разработана модель процесса возникновения и устранения неисправностей технической системы в виде интегрированной РССП на CPN Tools. Каждому переходу присваивается временная метка, значение которой определяет времени пребывания маркера в соответствующей позиции, где матрица темпов переходов в разработанной модели РССП представляется вектором модельных времен. Изменение маркировок происходит по двум причинам: выполнение условия срабатывания перехода и завершение течения времени задержки перехода.

На основе известных статистических данных об интенсивностях возникновения отказов и длительностях операций поиска неисправностей, замены и ремонта отказавшего блока, формированы структурные элементы РССП.

Случайным может быть число неисправных блоков, темпы появления отказов, темпы поиска неисправных блоков и восстановление блоков и т.п. Каждому переходу $t_j \in T$ сопоставляется темп $\theta_j \in \Omega$. На основе функции входной и выходной инцидентности строится дуги между позициями и переходами РССП. При компьютерной симуляции получено последовательность срабатываемых переходов и векторы распределения вероятностей наличия фишек. Модель позволяет разрешить конфликтных ситуаций и предотвратить тупиковых состояний в интегрированной РССП.

Четвертая глава посвящена к моделированию нечеткого управления на основе гибридного подхода с применением НРСР, где комбинированы методы, сосредоточившиеся на

модельных абстракциях (интегрированный НРСП) и логических абстракциях (метод нечеткого вывода), и включены два программные инструментальные средства – приложение Fuzzy Toolbox системы моделирования MATLAB и платформа имитационного моделирования CPN Tools на основе СП.

Введенным механизмом нечеткого вывода НРСП обеспечивает лингвистический подход используя программно–инструментальную платформу CPN Tools. Соответственно полученным значениям принимаются решения, осуществляется функционирование НРСП и реализуется имитация функционирования управляемой системы.

Нечеткая модель управления на основе гибридного подхода с применением НРСП. Важнейшей задачей при разработке ИСУ насосной системы является моделирование системы управления двигателем, для более точной и плавной регулировки скорости (частоты вращения двигателя) в пределах нагрузок, соответственно режимам водопотребления. Водопотребление по характеру имеет неопределённостей – ярко выраженные колебания по времени. Соответственно нечеткому характеру изменения расхода воды по времени, следует непрерывно регулировать насосного оборудования.

При разработке модели нечеткого управления регулирования скорости насосного агрегата рассматривается основные принципы управления (не детальная конструкция) при функционировании по изменяющему суточному водопотреблению. Текущая информация при функционировании системы с помощью процедуры фаззификации преобразуется в лингвистические величины. С помощью базы правил осуществляется формирование логического решения. Система продукционных правил, описывавших причинно-следственных связей между состояниями и событиями в системе модифицируется в алгоритм, который реализуется и графически, и программно, в следствии чего производится компьютерное исследование системы.

Начальный этап решения поставленной задачи состоит из формирования универсумов нечетких параметров. В

гидродинамике для описания течения жидкостей в каждой точке потока в основном применяются Уравнения Навье – Стокса. Но расчет каждой отдельной пространственной точки потока невыполним по причине высокой трудоемкости, существующая аналитическая техника недостаточна для решения знаменитой задачи. Одно из часто практикуемых приближенных методов для решения этой задачи является построение суточного ступенчатого графика. Учитывая высказанных аспектов построен суточный ступенчатый график с определенным расчетом 74 л/сек расхода воды на десять тысяча условных жителей в Азербайджане и с характеристическим коэффициентом по стандарту EN 752 в системе MATLAB (рисунок 6).

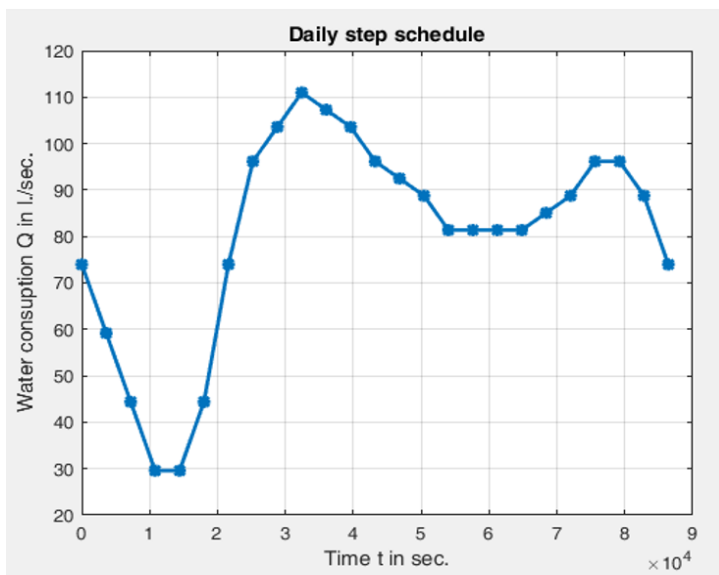


Рисунок 6. Суточный ступенчатый график расхода воды

Переменный t в графике (рисунок 6) является временем с интервалом 3600 секунд. Переменный Q в графике является расходом воды по соответствующим значениям времени и значением характеристической кривой. Интервал (20,120) охватывает вес диапазон (с резервным дополнением) изменения

расхода воды на 10000 условных жителей, условным диапазоном изменения скорости насоса выбран интервал (0,1000).

Фазификация переменных. Лингвистическая переменная «расход воды» (water consumption) определяется в множестве (универсуме) $X_{pe} = (20,120)$ л/сек. и имеет терм множество:

$$T_{расход\ воды} = \{ \text{«небольшой»}, \text{«средний»}, \text{«большой»} \}$$

Соответственно значениям терм множества $T_{расход\ воды}$ построены три функции принадлежности кусочно-линейного треугольного типа в графическом виде (рисунок 7), которые названы, как “nb”, “sr”, “b” соответственно именам термов.

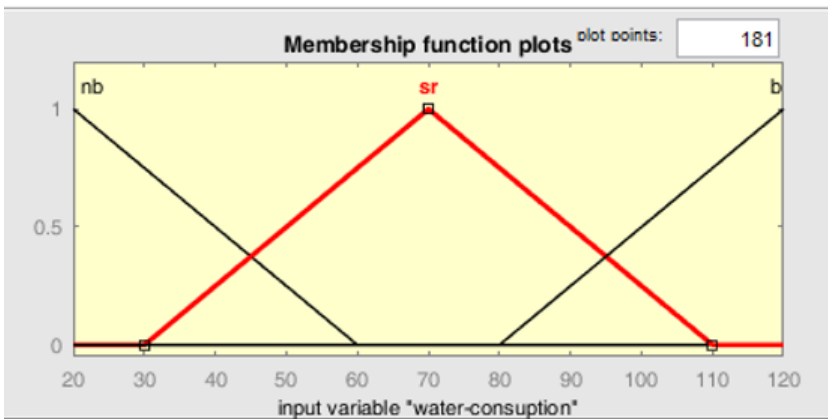


Рисунок 7. Функции принадлежности лингвистической переменной «расход воды»

Для лингвистической переменной «расход воды» построены три нечетких множества соответственно ее термам:

$$\tilde{A}_1 = (20, 60); \tilde{A}_2 = (30, 110); \tilde{A}_3 = (80, 120)$$

Лингвистическая переменная «скорость насоса» (pump speed) определяется в множестве (универсуме) $X_{ch} = [0,1000]$ (условная единица) и имеет терм множество:

$$T_{скорость\ насоса} = \{ \text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»} \}$$

Соответственно значениям этого терм множества построенные в графическом виде функции принадлежности названы, как “sn”, “ss”, “sv” соответственно именам термов (рисунок 8).

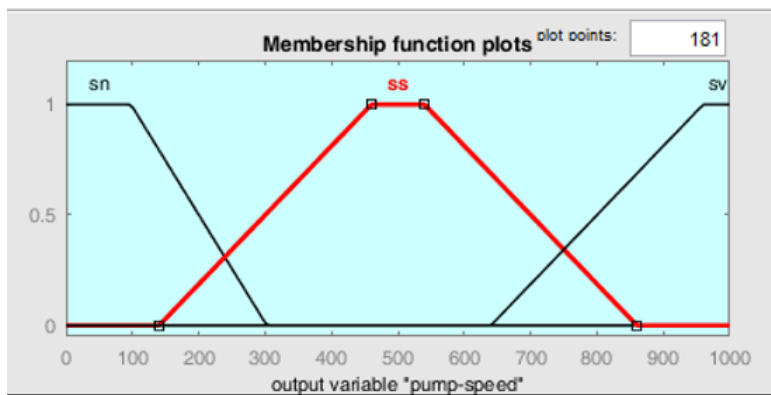


Рисунок 8. Функции принадлежности лингвистической переменной «скорость насоса»

Из рисунка (рисунок 8) видно, что для лингвистической переменной «скорость насоса» в универсуме $X_{сн}$ построены три нечетких множеств соответственно ее термам «низкая», «средняя», «высокая»:

$$\tilde{B}_1 = (0, 302.4); \tilde{B}_2 = (140, 860); \tilde{B}_3 = (640, 1000)$$

В окне редактора правил «Rule Editor» приложения Fuzzy Toolbox формированы нечеткие правила для создания базы правил, с помощью которых осуществляется нечеткое логическое решение – алгоритмом Мамдани⁸:

- If ("water consumption" is nb) then ("pump speed" is sn);
- If ("water consumption" is sr) then ("pump speed" is ss);
- If ("water consumption" is b) then ("pump speed" is sv).

⁸ Huseynzade, Sh.S. Regulation of the pumping unit speed according to changing daily water consumption by the method of fuzzy inference // Tallinn: The Baltic Scientific Journals PIRETC–2021, – v. 14, – issue 04, – p. 85-90.

В окне просмотра выполнения правил «Rule Viewer: PUMP CONTROL» реализовано графическое отображение нечеткого вывода (рисунок 9).

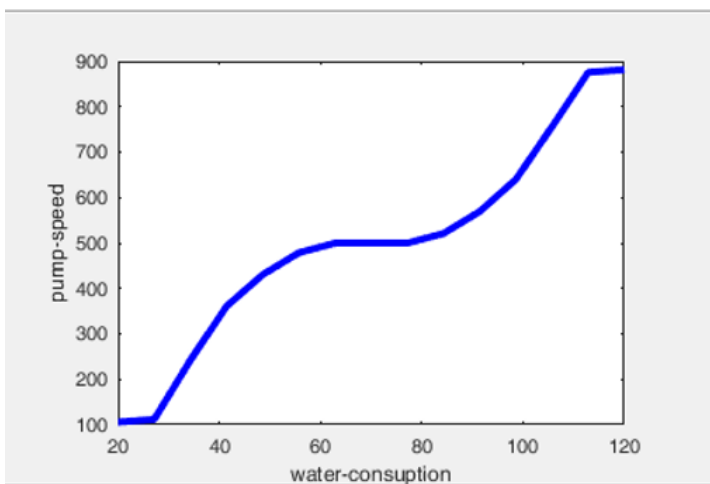


Рисунок 9. Графическое отображение нечеткого вывода

В окне просмотра выполнения правил «Rule Viewer: PUMP CONTROL» реализованы компьютерные эксперименты для разных значений (рисунок 10):

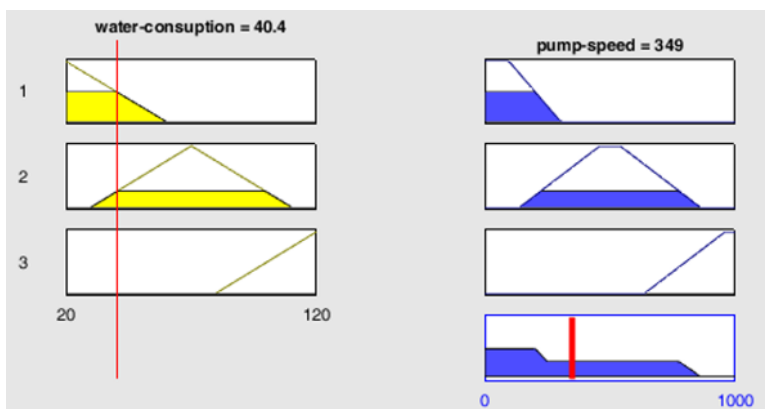


Рисунок 10. Визуализация результатов выполнения правил

Выполнены многочисленные эксперименты вводя разные входные значения переменной «расход воды», получены соответственные значения «скорость насоса» (Таблица 2).

Таблица 2. Результаты выполнения логического вывода

«расход воды»	«скорость насоса»	«расход воды»	«скорость насоса»
21.5	107	84.9	528
27.8	113	92.9	582
34.9	117	99.5	653
40.9	349	102.5	688
56.9	485	107.5	799
70.5	500	118.3	891

На основе всевозможных состояний и событий при управлении работы водяных насосов формированы множества позиций и переходов СП:

- Позиции: p_1 – в датчике регистрации имеется входная информация; p_2 – насос включен; p_3 – насос отключен; p_4 – расхода воды нет; p_5 – расход воды небольшой; p_6 – расход воды средний; p_7 – расход воды большой; p_8 – скорость насоса низкая; p_9 – скорость насоса средняя; p_{10} – скорость насоса высокая;

- Переходы: t_1 – ввод данных из регистрационного датчика в систему; t_2 – включение насоса; t_3 – отключение насоса; t_4 – не производить включение насоса; t_5 – перевести рабочую скорость к низкому значению; t_6 – перевести рабочую скорость к среднему значению; t_7 – перевести рабочую скорость к высокому значению.

Производственные правила нечеткой системы управления насосного агрегата:

1. Если в датчике регистрации имеется входная информация, тогда произвести ввод данных из регистрационного датчика в систему;

2. Если расхода воды нет и насос отключен, тогда не производить включение насоса;
3. Если расхода воды нет и насос включен, тогда производить отключение насоса;
4. Если расход воды небольшой и насос отключен, тогда производить включение насоса;
5. Если расход воды небольшой и насос включен и скорость насоса средняя, тогда перевести рабочую скорость к низкому значению;
6. Если расход воды небольшой и насос включен и скорость насоса высокая, тогда перевести рабочую скорость к низкому значению;
7. Если расход воды небольшой и насос включен и скорость насоса низкая, тогда не изменять скорость насоса;
8. Если расход воды средний и насос отключен, тогда производить включение насоса;
9. Если расход воды средний и насос включен и скорость насоса низкая, тогда перевести рабочую скорость к среднему значению;
10. Если расход воды средний и насос включен и скорость насоса высокая, тогда перевести рабочую скорость к среднему значению;
11. Если расход воды средний и насос включен и скорость насоса средняя, тогда не изменять скорость насоса;
12. Если расход воды большой и насос отключен, тогда производить включение насоса;
13. Если расход воды большой и насос включен и скорость насоса низкая, тогда перевести рабочую скорость к высокому значению;
14. Если расход воды большой и насос включен и скорость насоса средняя, тогда перевести рабочую скорость к высокому значению;
15. Если расход воды большой и насос включен и скорость насоса высокая, тогда не изменять скорость насоса.

На основе выше представленных продукционных правил построены матрицы входных и выходных инцидентов:

$$F(10,7) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$H(7,10) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Учитывая значений элементов матриц инцидентов $F(10,7)$ и $H(7,10)$, построена модель управления⁹ на РНСП (Рисунок 11). Структура организована в системе CPN Tools с синхронизацией языка CPN ML с пакетом MATLAB.

⁹ Гусейнзаде, Ш.С. Разработка нечеткой модели управления насосным агрегатом с применением раскрашенной сети Петри // – Воронеж: Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, – 2020. – №3, – с. 77-86.

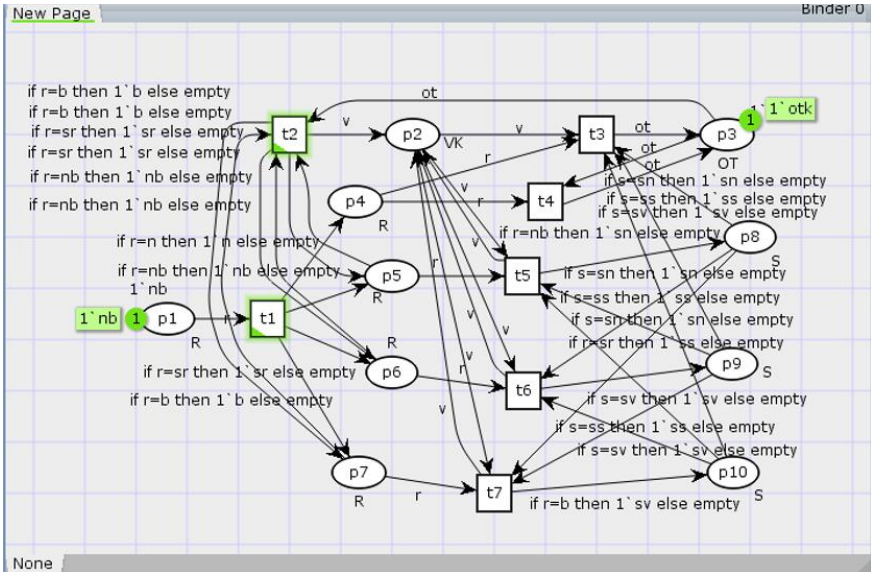


Рисунок 11. Граф-модель НРСЦ управления насосным агрегатом в начальном состоянии симуляции сети

Для построения графа-модели в системе CPN Tools описана стандартная декларация переменных и атрибуты элементов сети с применением CPN ML:

Standart Declarations

```
colset R=unit with n|nb|sr|b;      var r:R;
colset S=unit with sn|ss|sv;      var s:S;
colset OT = unit with otk;         var ot:OT;
colset VK = unit with vk;         var v:VK;
```

К дугам присвоены условия существования и разрешения движения по ним маркера заданного цвета, «empty» означает пустоту дуги:

If r = nb then 1`nb else empty; – Если во входной позиции имеется маркер “nb”, соответствующий ситуацию расход небольшой, тогда по дуге выполняется передача одного маркера “nb”, в противном случае дуга отсутствует.

If r = sr then 1`sr else empty;

If $r = b$ then Γ^b else empty;
If $r = n$ then Γ^n else empty.

К маркерам присвоены цвета (n), (nb), (sr), (b), (sn), (ss), (sv), (otk), (vk). Идентификаторы – nb, sr, b соответствуют значениям лингвистической переменной «расход воды», n – означает расхода воды нет, sn, ss, sv соответствуют значениям лингвистической переменной «скорость насоса», otk, vk соответствуют значениям насос отключен, насос включен.

Начальная маркировка, определяет пусковую ситуацию для симуляции графа модели НРСП и имеет вид:

$$\mu^0 = \{nb, \varepsilon, otk, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon\}$$

где ε означает пустого маркера. μ^0 соответствует ситуацию (Рисунок 13), в которой имеется входная информация об изменении расхода воды и насос находится в отключенном состоянии, t_1 срабатывает, маркировка имеет вид:

$$\mu^1 = \{\varepsilon, \varepsilon, otk, \varepsilon, nb, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon\}$$

Проведены компьютерные эксперименты симуляции сети при разной маркировке, соответственно ситуациям в системе и проведен анализ сети. По полученному дереву достижимостей НРСП определены свойства модели, такие как безопасность, ограниченность, живость, достижимость. Разработанная НРСП удовлетворяет условию ограниченности, так как максимальное число маркеров в граф модели не превышает цифру три, что в свою очередь обеспечивает и безопасность модели. Симуляционные эксперименты демонстрируют живость модели, так как не имеются тупиковые ситуации и все переходы выполнимы, требующие состояния достижимы.

В пятой главе исследованы некоторые аспекты при разработке интеллектуальных моделей исследования поведения сложных ДС связанных с использованием КА.

Несмотря на то, что мощным инструментом для изучения поведения технических и экономических объектов является аппарат имитационного моделирования СП, для многих объектов и процессов на низком уровне модули отдельных

процессов системы традиционно описываются КА. С другой стороны при управлении сложных ДС необходимо учитывать не только сами процессы, но и их взаимодействие, из-за чего на высоком уровне для анализа и формальной верификации имеет значимость задача преобразования КА в СП.

Рассмотрена задача преобразования КА в СП на основе теории матриц, представлена методика построения структурных элементов и матриц инцидентностей СП, которая моделирует конечный автомат, описываемый таблицами переходов и выходов. Разработан алгоритм автоматизации преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инцидентностей СП¹⁰. Приведена демонстрация функционирования алгоритма на основе простой модели функционирования транспортной системы (ТС) гибкого автоматизированного участка (ГАУ). На основе матрицы инцидентностей, полученной в результате функционирования алгоритма, построена модель СП в виде графа, имитирующего КА. Программная реализация алгоритма выполнена в кроссплатформенной объектно-ориентированной системе программирования C++.

КА задан функциями переходов и выходов:

$$\varphi: (X \times U) \rightarrow X$$

$$\psi: (X \times U) \rightarrow Y$$

Где: $X = (x_1, x_2, \dots, x_z)$ – конечное множество внутренних состояний автомата, $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ – множество входных сигналов, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_g)$ – множество выходных сигналов, $z \in N, m \in N, g \in N$ – конечные числа.

$\varphi: (x, u)$ – функция переходов автомата, задающая однозначное отображение множества пар (x, u) , где $u \in U$ и $x \in X$, в множество X :

¹⁰ Ахмедов, М.А., Гусейнзаде, Ш.С., Насирова, Е.А. Разработка алгоритма автоматизации преобразования конечного автомата в сеть Петри // – Москва: Автоматизация. Современные технологии. – 2019. Т. 73, №3, – с. 108-112.

$\psi: (x, u)$ – функция выходов автомата, задающая однозначное отображение множества пар (x, u) , где $u \in U$ и $x \in X$, в множество Y :

$x_0 \in X$ – начальное состояние автомата;

КА может быть задан в виде графа, таблиц переходов и выходов и аналитическими способами.

Функции переходов и выходов $\varphi: (x, u)$ и $\psi: (x, u)$ КА представлены табличным способом (Таблица 3), (Таблица 4):

	x_1	x_2	...	x_z
u_1	$\varphi(x_1, u_1)$	$\varphi(x_2, u_1)$	...	$\varphi(x_z, u_1)$
u_2	$\varphi(x_1, u_2)$	$\varphi(x_2, u_2)$	...	$\varphi(x_z, u_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
u_m	$\varphi(x_1, u_m)$	$\varphi(x_2, u_m)$	...	$\varphi(x_z, u_m)$

Таблица 3. Таблица переходов КА.

$$\varphi: (x_i, u_j) \rightarrow \begin{cases} x_k, & \text{если } x_i \wedge u_j \in \bullet x_k; \\ \varepsilon, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Где $(k = \overline{1, z})$, ε – пустой элемент.

Таблица 4. Таблица выходов КА

	x_1	x_2	...	x_z
u_1	$\psi(x_1, u_1)$	$\psi(x_2, u_1)$	...	$\psi(x_z, u_1)$
u_2	$\psi(x_1, u_2)$	$\psi(x_2, u_2)$	...	$\psi(x_z, u_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
u_m	$\psi(x_1, u_m)$	$\psi(x_2, u_m)$	...	$\psi(x_z, u_m)$

$$\psi : (x_i, u_j) \rightarrow \begin{cases} y_k, & \text{если } x_i \wedge u_j \in \bullet y_k; \\ \varepsilon, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Где $k = \overline{1, g}$, ε – пустой элемент.

Матрица из индексов переходов $C = \{c_{j,i}\}$ формируется на основе таблицы переходов КА¹¹ (таблица 3.):

$$c_{j,i} = \begin{cases} k, & \text{если } \varphi : (x_i, u_j) \rightarrow x_k; \\ 0, & \text{если } \varphi : (x_i, u_j) \rightarrow \varepsilon. \end{cases}$$

где $i = \overline{1, z}$; $k = \overline{1, z}$; $j = \overline{1, m}$.

Матрица из индексов выходов $B = \{b_{j,i}\}$ формируется на основе таблицы выходов КА (таблица 4.):

$$b_{j,i} = \begin{cases} k, & \text{если } \psi : (x_i, u_j) \rightarrow y_k; \\ 0, & \text{если } \psi : (x_i, u_j) \rightarrow \varepsilon. \end{cases}$$

где $i = \overline{1, z}$; $k = \overline{1, g}$; $j = \overline{1, m}$.

Известно, что матрица входных инцидентий СП $F = \{f_{i,j}\}$ определяется как

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in \bullet t_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Матрица выходных инцидентий СП $H = \{h_{j,i}\}$ определяется как

$$h_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in t_j^\bullet; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

где $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$; (n – число позиций, m – число

¹¹ Huseynzade, Sh.S. Transformation of finite automata tables into incident matrices of Petri net // Proceedings of the 7th International Conference COIA–2020, – Baku: BSU, – 26 – 28 August, – 2020, v.2, – p. 173-176.

переходов).

Представленная методика решения задачи преобразования КА в СП на основе теории матриц, сведена к формированию значений элементов входных и выходных матриц инцидентностей СП на основе значений элементов матриц индексов переходов и выходов КА. По имеющейся топологии преобразования КА в СП и проведенных исследований относительно к решению поставленной задачи представлен метод на основе выдвинутых и доказанных теорем:

Теорема 1. Каждому отличительному от нуля элементу матрицы индексов переходов КА соответствуют единичные элементы матриц входных и выходных инцидентностей СП имитирующей данного КА, которые определяются по нижеследующим формулам:

$f_{m+i,j} = 1$, $f_{j,j} = 1$ и $h_{j,m+k} = 1$; где $i = \overline{1, z}$; $k = \overline{1, z}$; $j = \overline{1, m}$. (m – число входных сигналов, z – число внутренних состояний)

Теорема 2. Каждому отличительному от нуля элементу матрицы индексов выходов КА соответствуют единичные элементы матриц входных и выходных инцидентностей СП имитирующей данную КА, которые определяются по нижеследующим формулам:

$f_{m+i,j} = 1$, $f_{j,j} = 1$ и $h_{j,m+z+k} = 1$; где $i = \overline{1, z}$; $k = \overline{1, g}$; $j = \overline{1, m}$. (где m , g – соответственно числа входных и выходных сигналов, z – число внутренних состояний)

Разработан алгоритм автоматизации преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инцидентностей СП, программная реализация алгоритма выполнена в кроссплатформенной объектно-ориентированной системе программирования C++. На основе заданных моделей в виде КА продемонстрирована выполнение алгоритма и проведена верификация, произведены компьютерные эксперименты, получены достоверные результаты.

Представленный подход преобразования КА в СП имеет значительную роль при моделировании сложных дискретных систем, в том же числе и функционирующих в неопределенной

среде. При этом заключении появляется вопрос о значимости представленного метода преобразования КА в СП при моделировании сложных дискретных систем, так как классический КА не может иметь дело с системной неопределенностью. Вопрос определяется тем, что метод обеспечивает структурную преобразованию КА в СП и при этом сохраняются персональные свойства всех структурных элементов. КА и нечеткий или стохастический КА по статической структуре не отличаются, между ними имеется разница в качественных параметрах структурных элементов и функций переходов и выходов автомата. При этом структурное преобразование отличительных видов, в частном случае обычных и нечетких, стохастических КА в СП совмещаются в одну задачу. В соответствии свойствам структурных элементов СП принимает при преобразовании определенную расширенную структуру, в том числе и нечеткую.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ исследований в области ИСУ сложных ДС на основе литературных источников, сделан вывод, что построенные модели не совсем близки к реальным поведением сложных ДС и повышение эффективности моделирования ДС обуславливается применением современных тенденций ИИ. Для интерпретации особенностей различных сложных ДС обоснован подход на основе имитационного моделирования с разными расширенными модификациями СП и их совмещающими видами. Для применения в качестве базового инструментально-программного средства обоснован выбор системы CPN Tools с открытым принципом внесения программных модулей к отдельным структурным элементам модели и возможностями проведения симуляционных экспериментов.

2. Разработаны математическое представление и алгоритм функционирования обобщенных РСР, который объединяет две концепции – перерождающие и селективные РСР, где к условиям выполнения переходов введены дополнительные правила определения цветов входящих и исходящих маркеров.

Обосновано расширение моделирующих возможностей обобщенных РСП, особенно при моделировании и верификации средств управления процессами ГПС. Алгоритм реализован с применением языка CPN ML, на основе которого разработана модель управления модуля обрабатывающий центр ГПС.

3. Разработана модель для определения устойчивости "в целом" эволюционного нечеткого регулятора в системе CPN Tools, которая позволяет без лишних затрат повысить устойчивость системы автоматического управления на этапе проектирования. Обоснована полезность представленной методики анализа при применении в распределенных сетевых экспертных системах, также в системах обслуживания массового пользователя.

4. Разработана интегрированная модификация НРСП, в которой функции принадлежности термов лингвистической переменной применены к маркерам в роле цвета, дугам вставлены нечеткие условия существования в зависимости от значений лингвистической переменной, что обеспечивает новый качественный характер связи между структурными элементами сети. В представленной НРСП параллельно с расширением моделирующих возможностей, обосновано и уменьшение модельного пространства, что является значительной задачей в теории СП. С применением НРСП разработана модель автоматизации адаптивного нечеткого управления водяных насосов соответственно уровням воды в насосном колодце.

5. Разработаны алгоритмы функционирования комбинированной модифицированной НСП и ССП. Комбинированная НСП позволяет моделировать нечетких продукционных правил, основные части которых представляются в виде структурных элементов модели, а ССП предусмотрена для удобства решения конкретных задач моделирования сложных ДС с вероятностными свойствами. Обосновано, что представленные модификации являются комбинацией трех видов соответственно НСП, ССП и обладают преимуществами всех троих. Разработана нечеткая модель контрольной системы производственного модуля в виде НСП,

осуществлена компьютерная реализация модели и выполнен анализ.

6. Разработан оригинальный гибридный подход к моделированию интеллектуального управления путем создания теории и методологии разработки функциональных гибридных моделей систем с применением интегрированного НРСП для дискретных процессов, метода нечеткого логического вывода для непрерывных процессов и современных программно-инструментальных систем моделирования CPN Tools и MATLAB. Разработанный гибридный метод характеризуется параллельной интерпретацией дискретных и непрерывных процессов, компактностью модельного пространства, внедрением адаптивного поведения, гибкостью программного обеспечения.

7. Разработана модель нечеткого управления двигателем водяного насоса, для более точной и плавной регулировки скорости в пределах нагрузок соответственно режимам водопотребления, где реализован гибридный подход моделирования с применением НРСП. Разработанная модель повышает адаптивность системы, что обеспечивает экономное водопотребление, энергопотребление по сравнению с управлением по традиционным методам, а также уменьшает выбросов углекислого газа, опасно влияющего на окружающую среду.

8. Представлена методика построения СП имитирующего КА, на основе преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инцидентов СП. Выдвинуты и доказаны теоремы предлагающие формулы для определения элементов матриц инцидентностей СП имитирующей КА. Показана, что при преобразовании КА в СП сохраняются персональные свойства всех структурных элементов и соответственно которым СП принимает определенную расширенную модификацию, в том числе и нечеткую. Разработан алгоритм автоматизации преобразования, выполнена программная реализация алгоритма в системе программирования C++. Обосновано значительность

предложенного метода преобразования КА в СП при разработке ИСУ сложных ДС имеющих модулей в виде дискретных систем, проектированных с применением КА.

9. Полученные результаты имеют теоретическое значение – развитие теоретических основ интеллектуальных систем автоматического управления на основе разработанных обобщенных, интегрированных, комбинированных расширений СП, представленной гибридизации и метода преобразования КА в СП. Полученные результаты наряду с теоретическими качествами, также имеют практическую значимость, применение разработанных подходов, методов и моделей может быть эффективным при моделировании и верификации средств управления в этапе проектирования ГПС, в экспертных системах, в задачах обслуживания массового пользователя, в процессах декомпозиции и управлении дискретных устройств, в системах диспетчерского управления сложных ДС, функционирующих в неопределенной среде с нечетким характером, в частности в термических, водораспределительных и нефтедобывающих.

Список опубликованных научных работ по теме диссертации

1. Мустафаев, В.А., Гусейнзаде, Ш.С. Разработка алгоритма вычисления элементов вектора распределения вероятностей стохастических сетей Петри // – Москва: Естественные и технические науки, – 2009. №4(42), – с. 409-415. (РИНЦ).
2. Мустафаев, В.А. Гусейнзаде, Ш.С. Джавадова, С.Р. Программная реализация компьютерной системы моделирования и анализа неопределенной среды с применением расширенных сетей Петри // – Сумгаит: Научные известия СГУ, – 2011. №2(11), – с. 102-105.
3. Akhmedov, M.A., MustafaeV, V.A., Huseynzade, Sh.S. Presentation and analysis of fuzzy rules productions using a modified fuzzy Petri net // The 5th International Conference on Control and optimization With Industrial applications, Baku, – 27-29 August, – 2015, – p. 184-186.

4. Мустафаев, В.А., Гусейнзаде, Ш.С., Джафарова, Ш.М. Разработка нечеткой сетевой модели системы контроля обрабатывающих устройств // Материалы международной научно-технической конференции «Интеллектуальные технологии в машиностроении». – Ваку, – 28-30 сентября, – 2016, – с. 643-647.
5. Гусейнзаде, Ш.С., Салманова М.Н. Определение вероятностных характеристик при формировании структуры стохастических сетей Петри // – Сумгаит: Научные известия СГУ, – 2016. №4, – с. 65-69.
6. Гусейнзаде, Ш.С., Курбанова С.И. Анализ модели эволюционного нечеткого регулятора с применением сетей Петри // Материалы Республиканской научной конференции «Задачи прикладной математики и новые информационные технологии», – Сумгаит, –15-16 декабря, – 2016, – с. 288-289.
7. Гусейнзаде, Ш.С., Насирова, Е.А. Логическая структуризация компьютерных сетей с применением раскрашенных сетей Петри // – Сумгаит: Научные известия СГУ, – 2017. №1, – с. 60-64.
8. Мустафаев, В.А., Гусейнзаде, Ш.С., Джафарова, Ш.М. Анализ продукционных моделей динамических взаимодействующих процессов с применением модифицированных нечетких сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий, – 2017. №2(146), – с. 21-25. (WOS), DOI:10.14489/vkit.2017.02.pp.021-02
9. Гусейнзаде, Ш.С., Насирова, Е.А. Пример решения задачи преобразования конечного автомата в сеть Петри // Материалы международной научно-технической конференции «Наука, технология, производство – 2017. Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств». – Уфа, – 22 мая, 2017, – с. 347-348. (РИНЦ).
10. Гусейнзаде, Ш.С., Насирова, Е.А. Создание структурных элементов сети Петри, имитирующей конечного автомата // Материалы международной научной конференции «Теоретические и прикладные проблемы математики». – Сумгаит, – 25-26 мая, – 2017, – с. 215-216.

11. Гусейнзаде, Ш.С., Основные аспекты построения графа модели логической структуризации компьютерных сетей в системе CPN Tools // Материалы международной научной конференции «Теоретические и прикладные проблемы математики». – Сумгаит, – 25-26 мая, – 2017, – с. 295-296.
12. Huseynzade, Sh.S. Automation Model of the Adaptive Control on Petri nets // – Kyiv: Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv, a series of physical and mathematical sciences, – 2018. №1, – p. 55-59. (Zentralblatt MATH), <https://zbmath.org/authors/?q=huseynzade>
13. Мустафаев, В.А., Гусейнзаде, Ш.С. Разработка модели управления обрабатывающего центра с применением раскрашенных сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий, – 2018. – №3(165), – с. 36-44. (WOS), DOI:10.14489/vkit.2018.03.pp.036-044
14. Гусейнзаде, Ш.С., Курбанова С.И. Разработка и анализ модели эволюционного нечеткого регулятора с применением CPN Tools // – Сумгаит: Научные известия СГУ, – 2018. №3, – с. 66-70.
15. Alkishiyeva K.E., Huseynzade, Sh.S. Development of the Decision Model on the Petri Nets // XXXI International Conference Problems of Decision Making Under Uncertainties (PDMU), book of abstracts. Lankaran, – 3-8 july, – 2018, – p. 19.
16. Гусейнзаде, Ш.С., Формирование матрицы инцидентий сети Петри, имитирующей конечного автомата // Материалы международной научной конференции «Информационные системы и технологии. Достижения и перспективы», – Сумгаит, – 15-16 ноября, – 2018, – с. 290-292.
17. Гусейнзаде, Ш.С., Основные аспекты применения сетей Петри к моделированию адаптивного нечеткого управления // Материалы международной научной конференции «Информационные системы и технологии. Достижения и перспективы», – Сумгаит, – 15-16 ноября, – 2018, – с. 260-262.
18. Huseynzade, Sh.S. Main Aspects of the Use of Petri Nets to Adaptive Fuzzy Control Modeling // Proceedings of the International Conference "Modern Problems of Innovative Technologies in Oil

and Gas Production and Applied Mathematics", – Baku, – 13-14 december, – 2018, – p. 320-322.

19. Huseynzade, Sh.S., Transformation of the Tables of Transitions and Outputs of Finite Automata in the Matrix of Incidents of Petri Net // Proceedings of the International Conference "Modern Problems of Innovative Technologies in Oil and Gas Production and Applied Mathematics", – Baku, – 13-14 december, – 2018, – p. 322-324.

20. Гусейнзаде, Ш.С. Формирование интегрированных стохастических сетей Петри // V Международная Научно – практическая очно – заочная конференция «Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий», – Оренбург, – 22 марта, – 2019, – с. 134-138. (РИНЦ).

21. Гусейнзаде, Ш.С. Моделирование с применением интегрированных стохастических сетей Петри // – Уфа: Информационные технологии. Проблемы и решения, – 2019, – №2(7), – с. 30-37. (РИНЦ).

22. Гусейнзаде, Ш.С. Модель нечеткой системы управления насосным агрегатом на сетях Петри // Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием: «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения». – Тольятти, – 22-24 апреля, – 2019, – ч.1, – с. 122-127. (РИНЦ).

23. Гусейнзаде, Ш.С. Подход к решению задачи устойчивости эволюционного нечеткого регулятора с применением сетей Петри // Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием: «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения». – Тольятти, – 22-24 апреля, – 2019, – ч.1, – с. 115-121. (РИНЦ).

24. Гусейнзаде, Ш.С., Дадашова, И.В. Подход к решению задачи анализа свойства устойчивости эволюционного нечеткого регулятора // Материалы Республиканской научной конференции «Актуальные проблемы математики и механики», – Баку, 2-3 мая, – 2019, – с. 94-95.

25. Гусейнзаде, Ш.С. Основные аспекты разработки интегрированных раскрашенных нечетких сетей Петри // Сборник трудов XXXII Международной научной конференций «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ», – Санкт-Петербург, – 3-7 июня, – 2019, – с. 124-130. (РИНЦ).
26. Мустафаев В.А., Гусейнзаде, Ш.С., Разработка алгоритма функционирования обобщенных раскрашенных сетей Петри // Материалы XIII Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», – Махачкала, – 16-20 сентября, – 2019, – с. 119-120. (РИНЦ).
27. Ахмедов, М.А., Гусейнзаде, Ш.С., Насирова, Е.А. Разработка алгоритма автоматизации преобразования конечного автомата в сеть Петри // – Москва: Автоматизация. Современные технологии. – 2019. Т. 73, №3, – с. 108-112. (РИНЦ).
28. Гусейнзаде, Ш.С. Анализ свойства устойчивости эволюционного нечеткого регулятора с применением сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий, – 2019. – №8, – с. 15-22. (WOS), doi.org/10.14489/vkit.2019.08.pp.015-021
29. Гусейнзаде, Ш.С. Моделирование с применением интегрированных раскрашенно стохастических сетей Петри на базе CPN Tools // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «IT-технологии: развитие и приложения», – Владикавказ, – 12 – 13 декабря, – 2019, – с. 44-53. (РИНЦ).
30. Hüseyinzadə, Ş.S. Mexaniki emal mərkəzinin CPN Tools sistemində produksiya qaydaları əsasında modelləşdirilməsi // "Azərbaycan və Türkiyə Universitetləri: təhsil, elm, texnologiya" I Beynəlxalq elmi–praktiki konfransın materialları, III hissə, – Bakı, – 18 – 20 dekabr, – 2019, – s. 230-235.
31. Гусейнзаде, Ш.С. Организация ввода нечеткого лингвистического параметра в раскрашенную сеть Петри // Сборник материалов VI Международной научно – практической очно – заочной конференции «Проблемы и перспективы

внедрения инновационных телекоммуникационных технологий», – Оренбург, – 20 марта, – 2020, – с. 179-185. (РИНЦ).

32. Гусейнзаде, Ш.С. Представление лингвистических переменных в раскрашенных сетях Петри // Материалы Республиканской научной конференции «Фундаментальные проблемы математики и применение интеллектуальных технологий в образовании», – Сумгаит: СГУ, – 23-24 апреля, – 2020, – с. 171-173. (РИНЦ).

33. Гусейнзаде, Ш.С. Основные аспекты моделирования с применением обобщенных раскрашенных сетей Петри // Материалы международной научной конференции «Информационные системы и технологии. Достижения и перспективы», – Сумгаит, – 09-10 июля, – 2020, – с. 286-288.

34. Huseynzade, Sh.S. Transformation of finite automata tables into incident matrices of Petri net // Proceedings of the 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA-22), – Baku, – 26-28 August, – 2020, v.2, – p. 173-176. (WOS).

35. Гусейнзаде, Ш.С. Разработка нечеткой модели управления насосным агрегатом с применением раскрашенной сети Петри // – Воронеж: Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, – 2020. – №3, – с. 77-86. (WOS), DOI:10.17308/sait.2020.3/3042

36. Гусейнзаде, Ш.С. Разработка программного обеспечения автоматизации преобразования конечного автомата в сеть Петри // – Сумгаит: Научные известия СГУ, – 2020. Т. 20, – №3, – с. 55-62. (РИНЦ).

37. Гусейнзаде, Ш.С., Моделирование интеллектуальных систем управления с применением модифицированных нечетких раскрашенных сетей Петри // – Москва: Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – №10, – с. 30-37. (РИНЦ), DOI:10.14489/vkit.2020.10.pp.030-037

38. Huseynzade, Sh.S. Formation of a modified fuzzy colored Petri net: [Electronic resource] / Proceedings of the XV International

Conference Measurement and control in complex systems (MCCS), – Vinnytsia, – 8-10 October, – 2020, – p.1. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30560>

39. Huseynzade, Sh.S. Application of the logic output method for regulation of the pump unit parameters // Proceedings of the V All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Energy Efficiency: Science, Technology, Energy"– Kyiv, – 25 november – 2020, –v.1, – p. 3-6.

40. Hüseynzadə, Ş.S. Linqvistik parametrlin intellektual idarəetmə sistemində təsviri // “Müasir informasiya, ölçmə və idarəetmə sistemləri: problemlər və perspektivlər, MİÖİS’2020” ikinci Beynəlxalq elmi–praktik konfransın tezislər toplusu. – Bakı, – 07-08 dekabr, – 2020, – s. 322-323.

41. Гусейнзаде, Ш.С. Математическая формализация представления динамических интеллектуальных систем // – Сумгаит: Научные известия СГУ, – 2021. Т. 21, №4, – с. 69-72. (РИНЦ).

42. Гусейнзаде, Ш.С. Моделирование модуля механообработки в гибкой производственной системе с применением обобщенных раскрашенных сетей Петри // Материалы XIV Международной конференции, «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики», – Махачкала, – 16-19 сентября, – 2021, – с. 100-102. (РИНЦ).

43. Hüseynzadə Ş.S., Nəsirova E.Ə. Süni intellekt elementləri daxil olan dinamik sistemlərin formal təsvirinin işlənməsi // “Riyaziyyatın tətbiqi məsələləri və yeni informasiya texnologiyaları” IV Respublika elmi konfransının materialları, –Sumqayıt, – 09-10 dekabr, – 2021, –s. – 145-147.

44. Huseynzade, Sh.S. Regulation of the pumping unit speed according to changing daily water consumption by the method of fuzzy inference // Tallinn: The Baltic Scientific Journals PIRETC (Proceedings of The International Research, Education & Training Center). –2021, – v. 14, – issue 04, – p. 85-90.

45. Huseynzade, Sh.S., Dadashova, I.B. Approach to the fuzzy model development for a pump unit control system on bases of Petri

nets // Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA-2022), – Baku, – 24-26 August, – 2022, – v. 2, – p. 219-221. (WOS).

46. Гусейнзаде, Ш.С. Определение универсума суточного водопотребления для построения нечетких логических моделей // «Материалы Республиканской научной конференции «Прикладные задачи математики и новые информационные технологии», – Сумгаит, 15-16 декабря, – 2022, – с. 139-141.

Научные результаты, полученные в работах, опубликованных совместно с соавторами, принадлежат соискателю.

Защита диссертации состоится 01 марта 2024 года
в 14⁰⁰ на заседании Диссертационного совета ЕД 1.20
действующего на базе Института систем управления
Министерства науки и образования Азербайджанской
Республики.

Адрес: Баку, ул. Б.Вахабзаде, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
систем управления Министерства науки и образования
Азербайджанской Республики.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на
официальном сайте Института систем управления Министерства
науки и образования Азербайджанской Республики.

Автореферат разослан по
соответствующим адресам _____ февраля 2024 года.

Подписано в печать: .01.2024

Формат бумаги: А5

Объём: 78000

Тираж: 70