

На правах рукописи

Даденков Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПОДСИСТЕМ СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
С ТРЕБУЕМЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пермь, 2016

Работа выполнена автором в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Кон Ефим Львович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Куликов Геннадий Григорьевич
профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»;

кандидат технических наук, доцент
Ланских Юрий Владимирович
доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» (КНИТУ-КАИ).**

Защита состоится «17» февраля 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.188.04 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, к.345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «16» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Продуктивное развитие и интеграция современных средств вычислительной техники, внедрение распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) в сфере автоматизации технологических процессов и производств способствуют совершенствованию промышленности и других отраслей народного хозяйства. Распространение в последнее десятилетие получили распределённые автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), подсистемы сбора и передачи информации в которых построены на основе fieldbus-технологий. Реализация распределенной автоматизированной системы в инфраструктуре fieldbus, объединяющей на низовом (полевом) уровне РИУС датчики и исполнительные механизмы и обеспечивающей процессы управления, сбора, передачи и обработки технологической информации, характеризуемые информационным запаздыванием, существенно определяет качество управления. Недостаточное число отечественных и зарубежных публикаций по данной теме актуализирует решение проблемы создания распределённой системы управления с требуемыми показателями качества. Для этого необходимо проработать комплекс задач, связанных с построением полевой инфраструктуры автоматизированной системы управления. Обеспечение качества управления требует организации функционирования распределённой автоматизированной системы в реальном времени с заданными вероятностными и временными характеристиками (ВВХ) передачи и обработки технологической информации. Актуальными являются задачи разработки адекватных и корректных моделей функционирования, методов анализа и способов количественной оценки характеристик, алгоритма проектирования инфраструктуры распределённой автоматизированной системы управления с требуемыми ВВХ.

Степень разработанности темы. Анализ вероятностных и временных характеристик распределённых АСУ, составляющих их основу fieldbus-шин и протоколов функционирования посвящены работы Г.П. Башарина, П.П. Бочарова, В.В. Денисенко, С.Н. Степанова, А.Н. Туенбаева, А.А. Назарова, И.И. Хомичкова, С.Л. Шохора, Д.Ю. Кузнецова, J. Vinyes, M. Miskowicz, P. Buchholz, J. Plonnigs и др.

Недостаточность разработки вопросов количественной оценки ВВХ подсистем сбора и передачи распределённых автоматизированных систем управления обусловлена низкой детализацией моделей с учетом не всех значимых факторов функционирования, влияющих на информационное запаздывание в РИУС. Известные методы оценки ВВХ (интервалов и задержек сбора, передачи и обработки технологической информации) учитывают параметры функционирования промышленных fieldbus-систем, корреспондирующие с протоколами физического и канального уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем. При этом игнорируются значимые временные задержки, вносимые протоколами вышестоящих уровней модели и принципами обработки и передачи информации элементами fieldbus-системы, а также человеко-

машинными системами в составе РИУС. Это определяет проблему корректности оценки ВВХ, а значит, и существующих подходов к проектированию ИУС с заданными характеристиками, обеспечивающими качество управления и эффективность АСУТП. Указанное актуализирует решение задач разработки адекватных моделей и методов оценки и обеспечения ВВХ распределённых информационно-управляющих систем с корректной детализацией и учётом значимых факторов функционирования составляющих их fieldbus-шин.

Решение поставленных задач на примере РИУС с наиболее сложной и широко распространённой промышленной шиной LonWorks с протоколом случайного множественного доступа CSMA, применяемым и в других популярных промышленных шинах, определяет обобщённость разрабатываемых и предлагаемых в работе моделей и способов оценки характеристик, алгоритма проектирования. Таким образом, результаты работы применимы для широкого класса систем: LonWorks, Industrial Ethernet, ModbusTCP, EtherNet/IP, DeviceNet, ProfiNet, HSE и др.

Объектом исследования являются распределённые автоматизированные информационно-управляющие системы, подсистемы сбора, обработки и передачи информации которых построены на основе fieldbus-технологий с протоколами случайного множественного доступа (CSMA) и анализируются на примере LonWorks.

Предметом исследования являются алгоритмы проектирования распределённых ИУС, а также сопутствующие аналитические и имитационные модели fieldbus-систем (на примере LonWorks) и методы оценки и обеспечения требуемых вероятностных и временных характеристик обработки и передачи информации.

Цель диссертационной работы состоит в разработке алгоритмов проектирования РИУС с требуемыми вероятностными и временными характеристиками обработки и передачи информации, а также адекватных моделей и способов количественной оценки и обеспечения ВВХ распределённой системы (на примере fieldbus-шины LonWorks), обеспечивающих необходимое качество управления технологическими процессами.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. *Разработка функциональной модели* распределённой автоматизированной ИУС и *анализ* спектра алгоритмов и параметров протоколов функционирования (на примере промышленной шины LonWorks), потенциально значимо влияющих на вероятностные и временные характеристики сбора, передачи и обработки информации в АСУТП.

2. *Создание и применение подхода к построению аналитической модели и способа количественной оценки ВВХ* автоматизированной информационно-управляющей системы, *учитывающих* широкий спектр значимых протокольных и системных факторов функционирования промышленной шины LonWorks.

3. *Выбор среды моделирования, построение и анализ имитационной модели* распределённой информационно-управляющей системы, *учитывающей*, по сравнению с существующими моделями, наиболее полный спектр значимых факторов fieldbus-шины LonWorks.

4. *Построение методики оценки значимости* влияния на ВВХ факторов модели РИУС, анализируемой на примере системы LonWorks, *позволяющей* определять группы значимых факторов, учёт которых необходим для получения адекватных и корректных оценок характеристик запаздывания в АСУТП.

5. *Синтез алгоритма проектирования* распределённых информационно-управляющих систем с методами случайного множественного доступа CSMA с заданными ограничениями на стоимостную и вероятностно-временные характеристики сбора, обработки и передачи данных, определяющими качество управления технологическими процессами.

6. *Реализация предложенных в диссертации моделей, способов и алгоритма проектирования* при построении полевой инфраструктуры распределённой автоматизированной системы управления и противоаварийной защиты технологической установки гидроочистки дизельного топлива на основе промышленной шины LonWorks.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. *Предложена новая модель* РИУС, *учитывающая* широкий спектр выделенных потенциально значимых факторов функционирования промышленной шины LonWorks, в том числе *ранее не анализируемых* в известной литературе, требующих учёта для выполнения адекватной и корректной количественной оценки вероятностных и временных характеристик сбора и передачи информации АСУТП.

2. *Разработаны оригинальные аналитическая и имитационная модели* информационно-управляющей системы LonWorks, *позволяющие* корректно применять математический аппарат для совместного учёта дисциплин и факторов передачи и обработки технологической информации транспортной и прикладной подсистем модели РИУС и *выполнять* адекватную количественную оценку её ВВХ.

3. *Создана и апробирована методика количественной оценки значимости* влияния на ВВХ факторов функционирования автоматизированной ИУС (на примере LonWorks), *инвариантная* к fieldbus-технологии и *обеспечивающая* возможность определения: малозначимых факторов, отказ от учёта которых *позволяет* снизить вычислительную сложность расчёта модели; значимых факторов, учёт которых *обеспечивает* адекватность и корректность оценки характеристик информационного запаздывания АСУ.

4. *Впервые предложены общий и частный* (для LonWorks) *алгоритмы проектирования* информационно-управляющих систем с протоколами случайного множественного доступа CSMA, *обеспечивающие* требуемые вероятностные и временные характеристики обработки и передачи информации, *определяющие* необходимое качество управления технологическими процессами.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в получении адекватных и корректных результатов количественной оценки вероятностных и временных характеристик автоматизированной информационно-управляющей системы с полевой технологией LonWorks, что *позволяет* осуществлять эффективное построение подсистем сбора и передачи информации АСУТП с необходимыми показателями качества.

Результаты диссертационного исследования реализованы в рамках проекта ООО «ЛУКОЙЛ-Информ» (г. Пермь) при проектировании полевой инфраструктуры распределённой автоматизированной системы управления и противоаварийной защиты технологической установки гидроочистки дизельного топлива, созданной на основе промышленной шины LonWorks, а также внедрены в учебный процесс подготовки студентов направления 27.04.04 «Управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Методология и методы исследования. В ходе решения поставленных задач использовались математический аппарат теории вероятностей и математической статистики, теории марковских цепей, теории систем и сетей массового обслуживания, теории математического моделирования, теории вычислительных систем и программирования, методология построения имитационных моделей и экспериментов, информационные технологии.

Положения, выносимые на защиту:

1. *Аналитический подход* к построению модели функционирования и *способ* количественной оценки ВВХ автоматизированной информационно-управляющей системы с методами случайного множественного доступа CSMA, *реализуемые* на примере анализа системы LonWorks, *обеспечивающие* адекватность и корректность разработанных моделей и способа оценки информационного запаздывания сбора, передачи и обработки технологической информации распределённой АСУТП путём учета свойственных ей значимых, ранее не анализируемых в совокупности, протокольных и системных факторов функционирования (**п. 4, 8** паспорта специальности).

2. *Имитационная модель* функционирования ИУС LonWorks, реализованная с использованием агентного дискретно-событийного метода моделирования, *позволившего учесть*, в сравнении с существующими моделями, особенности реализации протокольного функционала элементами распределённой подсистемы сбора, передачи и обработки данных АСУТП, что *обеспечило* адекватность и *повысило* корректность оценки вероятностных и временных характеристик (**п. 4, 8** паспорта специальности).

3. *Алгоритм проектирования* автоматизированной информационно-управляющей системы с промышленной шиной LonWorks, *обеспечивающий* требуемые вероятностные и временные характеристики обработки и передачи данных АСУТП путём эффективной организации полевой инфраструктуры распределённой системы (**п. 8, 13** паспорта специальности).

4. *Результаты апробации алгоритма проектирования* при создании полевой инфраструктуры распределённой автоматизированной системы управления и противоаварийной защиты технологической установки гидроочистки дизельного топлива (АСУиПАЗ ТУГОДТ) на основе промышленной шины LonWorks, *установившие: соответствие* характеристик системы требованиям количества и качества выпускаемой продукции; *сокращение* стоимости существующей инфраструктуры на 18 %; *уменьшение* информационного запаздывания на участке АСУТП на 25 %, что *способствовало уменьшению* среднеквадратичного отклонения серосодержания целевого продукта (п. 8, 13 паспорта специальности).

Область исследования соответствует п. 4, 8 и 13 паспорта научной специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности).

Достоверность полученных результатов. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат теоретическим положениям, известным из публикаций других авторов, и подтверждаются результатами апробации и внедрения предложенных в диссертации моделей, методов и алгоритмов на предприятии.

Апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались на V Российской мультikonференции по проблемам управления «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах», г. Санкт-Петербург, 2012; VI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления, г. Санкт-Петербург, 2013; X Всероссийской школе-конференции молодых учёных «Управление большими системами», г. Уфа, 2013; XII Всероссийском совещании по проблемам управления, г. Москва, 2014; XV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», г. Казань, 2014; XII Всероссийской научной конференции по проблемам управления в технических системах, г. Санкт-Петербург, 2015; а также на семинарах кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Результаты диссертационного исследования внедрены:

– в рамках проекта ООО «ЛУКОЙЛ-Информ» (г. Пермь) в ходе проектирования полевой инфраструктуры распределённой АСУиПАЗ ТУГОДТ на основе промышленной шины LonWorks с требуемыми вероятностными и временными характеристиками сбора и обработки информации;

– в учебный процесс кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Выполнена регистрация программ для ЭВМ по реализации количественной оценки вероятностных и временных характеристик ИУС с промышленной шиной LonWorks, что подтверждается четырьмя свидетельствами регистрации.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 5 – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских диссертаций.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 200 страниц машинописного текста, из которых основной текст составляет 152 страницы, 76 рисунков и 25 таблиц, список литературы из 105 наименований, приложения (48 страниц).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы создания РИУС с требуемыми ВВХ сбора и передачи информации, обеспечивающими необходимое качество управления АСУТП, а также необходимость решения сопутствующих задач разработки адекватных моделей и способов количественной оценки вероятностных и временных характеристик системы, алгоритма проектирования полевой инфраструктуры распределённой системы управления со случайным доступом (CSMA).

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу архитектур и характеристик сбора, передачи и обработки информации автоматизированных ИУС на основе fieldbus, а также анализу их влияния на качество управления технологическими процессами.

Выполнен анализ архитектуры современной распределённой автоматизированной информационно-управляющей системы, проведен обзор составляющих её основу промышленных fieldbus-шин, стандартов функционирования, корреспондирующих с уровнями эталонной модели взаимодействия открытых систем (ВОС) и использующих распространённые протоколы случайного множественного доступа CSMA: LonWorks, EtherNet/IP, CAN, KNX, ProfiNet, ModbusTCP. Сходство архитектур промышленных систем, функциональности уровней модели ВОС определяет целесообразность выполнения общего анализа систем на примере наиболее сложной и распространённой технологии LonWorks.

Анализ характеристик распределённой системы устанавливает проблему влияния запаздывания передачи и обработки данных на показатели качества управления АСУТП. Решение проблемы обеспечения качества управления предложено путём проектирования полевой инфраструктуры РИУС с заданными ВВХ, что требует выполнения адекватной количественной оценки характеристик системы.

Вторая глава диссертационной работы посвящена решению задач анализа и систематизации в рамках модели автоматизированной ИУС значимых факторов функционирования fieldbus-системы (на примере LonWorks), учёт которых необходим для адекватной оценки ВВХ сбора, обработки и передачи информации АСУТП.

Анализ инфраструктуры распределённой системы управления, свойственных ей структур, параметров и алгоритмов функциональных подси-

стем позволил предложить наиболее полную модель полевого уровня РИ-УС, систематизирующую в рамках модели узла fieldbus-системы LonWorks (рисунок 1) более 70 основных факторов функционирования, влияющих на ВВХ передачи и обработки технологической информации.

Аналитический обзор работ, посвящённых количественной оценке характеристик промышленной системы LonWorks, в том числе трудов М. Miskowicz, Р. Buchholz, J. Plonnigs, с позиции предложенной модели РИУС, определяет практическую сложность использования существующих недостаточно корректных моделей и получаемых результатов оценки ВВХ. Недостаток обусловлен принятыми системами ограничений и учётом малого числа значимых факторов модели РИУС, преимущественно канального уровня модели ВОС. Это определяет проблему построения подсистемы сбора и передачи АСУТП с требуемыми ВВХ и актуализирует разработку корректной модели ИУС (на примере шины LonWorks) и способов количественной оценки её характеристик.

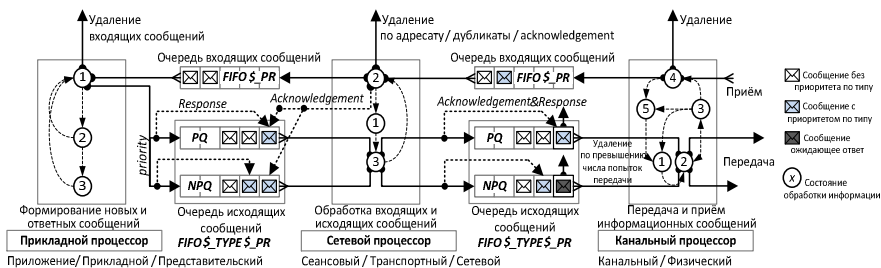


Рисунок 1 – Функциональная модель узла ИУС LonWorks

Анализ архитектур человеко-машинных систем выявил возможность учёта их влияния на запаздывание сбора и передачи информации в рамках анализируемого полевого уровня автоматизированной ИУС.

Третья глава диссертации посвящена разработке аналитических моделей ИУС LonWorks и способа оценки их вероятностно-временных характеристик сбора, передачи и обработки информации, определяющих запаздывание АСУТП.

Впервые для ИУС со случайным доступом предложен подход к решению задачи разработки корректной аналитической модели, основанный на двух этапах декомпозиции распределённой системы на независимые сегменты передачи и обработки технологической информации и на составляющие их транспортную и прикладную подсистемы узлов. Независимый анализ подсистем уменьшает сложность решаемой задачи, а также способствует учёту большого числа выделенных потенциально значимых факторов функционирования модели РИУС, что обеспечивает корректность разрабатываемых моделей по сравнению с известными.

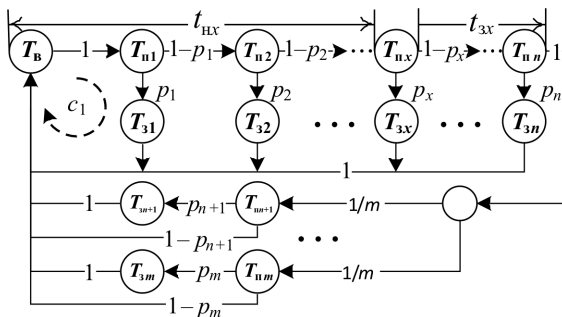


Рисунок 2 – Модель прикладной подсистемы узла ИУС

Разработка модели прикладной подсистемы выполняется с использованием аппарата теории вероятностей. Модель циклического алгоритма обслуживания неоднородных задач приложения узла и технологической информации представлена в виде графа состояний и переходов (рисунок 2), учитывающего множество ранее не анализируемых параметров: число n и m модулей приложения с различными приоритетами; среднее время обработки информации в точке входа T_B , проверки T_{n_i} , задачи T_{3_i} ; средние интервалы времени t_i между решением задач модулей. В ходе стохастического анализа модели получено выражение для оценки среднего времени задержки обработки информации модулем x приложения узла:

$$T_x = \frac{t_{nx} + t_{3x}}{2} + (T_B + T_n + T_3), \quad (1)$$

где t_n и t_3 – среднее время от начала цикла обслуживания до приоритетного модуля x и среднее время завершения цикла обслуживания после обслуживания модуля:

$$t_{3x} = \begin{cases} T_3 \cdot p_x & \text{при } x = n, \\ T_3 \cdot p_x + \sum_{i=x}^{n-1} \left[\prod_{k=x}^i (1-p_k) \cdot (T_n + p_i \cdot T_3) \right] & \text{при } x < n; \end{cases} \quad (2)$$

$$t_{nx} = \begin{cases} T_B & \text{при } x = 1, \\ T_B + T_n \cdot (x-1) + T_{внз} \cdot c_{x-1} & \text{при } x = 2, \\ T_B + T_n \cdot \left[x-1 + \sum_{i=2}^{x-1} ((i-1) \cdot c_i) \right] + T_{внз} \cdot \left[\sum_{i=1}^{x-1} \prod_{k=i}^{x-1} \begin{cases} c_k, k = i \\ 1 + c_k, k > i \end{cases} \right] & \text{при } x > 2. \end{cases} \quad (3)$$

Расчёт времени задержки (1) по (2), (3) производится по дополнительным соотношениям оценки вероятностей успешных проверок p и числа фрагментов цикла c модулей, представляемым функциями от экспоненциально распределённого времени между проверками и событиями модулей.

Предложенная модель и способ оценки характеристик преимущественно отличаются от предложенных М. Miskowicz, Д.Л. Дитрих учётом значимых факторов функционирования подсистемы и возможностью расчёта индивидуальных временных задержек обработки информации каждым модулем приложения, что повышает корректность результатов оценки ВВХ. Программная реализация способа оценки ВВХ подсистемы выполнена в математическом пакете MathCad и подтверждается свидетельством регистрации.

Разработка аналитической модели транспортной подсистемы (подсистемы передачи информации) выполнена с использованием аппаратов теории вероятностей, марковских цепей, систем массового обслуживания.

Первоначальный анализ транспортной подсистемы ИУС LonWorks выполнен в известном из работ М. Miskowicz режиме насыщения (максимальной загрузки) канала передачи постоянным числом активных узлов, что упрощает оценку ВВХ. При этом впервые при оценке ВВХ подсистемы выполнен учёт индивидуальных приоритетов узлов промышленной шины Lon, что повышает корректность получаемых результатов.

Анализ алгоритма доступа и передачи пакетов узлами по шине данных (рисунок 3) позволил оценить среднее время доставки информации:

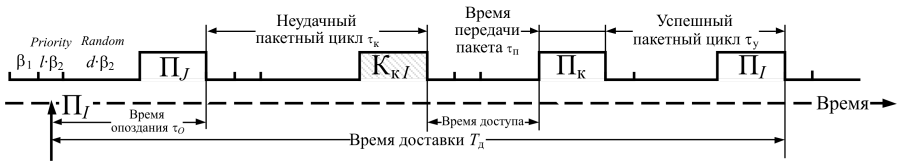


Рисунок 3 – Временная диаграмма доступа и передачи технологической информации

$$T_d = (\tau - \beta_1) + E \cdot \tau, \quad (4)$$

где τ – средняя продолжительность пакетного цикла; β_1 – задержка доступа; E – среднее количество пакетных циклов доступа для успешной передачи информации:

$$E = \frac{1}{m} \cdot \sum_{l=l_{\min}}^{l_{\max}} \frac{m_l}{P_{y(l)}^l}, \quad (5)$$

где m и m_l – количество узлов, соперничающих за доступ к шине данных, и узлов с приоритетом l ; $P_{y(l)}^l$ – вероятность успешной передачи 1 узлом с приоритетом l :

$$P_{y(l)}^l = \sum_{s=1}^W I(s > l) \cdot \frac{1}{W} \cdot \left(\frac{W-s}{W} \right)^{m_l-1} \cdot \prod_{r=l_{\min} \& \neq l}^{l_{\max}} D(s > r), \quad (6)$$

где W – ширина окна соперничества за канал, $W = 16 \cdot BL$; s – слот доступа; BL – прогнозируемая на канал нагрузка; $I(\cdot)$, $D(\cdot)$ – индикаторные функции возможного одновременного соперничества узлов с различными приоритетами.

Вероятность успешной передачи и коллизии:

$$p_y = \sum_{l=l_{\min}}^{l_{\max}} \left[m_l \cdot \sum_{s=1}^W \left[I(s > l) \cdot \frac{1}{W} \cdot \left(\frac{W-s}{W} \right)^{m_l-1} \cdot \prod_{r=l_{\min} \& \neq l}^{l_{\max}} D(s > r) \right] \right], \quad p_k = 1 - p_y. \quad (7)$$

Применение полученных выражений требует определения динамически изменяемых параметров m , W , оценка которых невозможна в режиме насыщения. Предложен граф состояний (n, m, b) и переходов модели в виде дискретной цепи Маркова (рисунок 4), описывающий динамику изменения прогнозируемой нагрузки (b) , как в известных работах, и дополнительно числа узлов-соперников за шину данных (n) и информационных сообщений (m) , что определяет корректность модели.

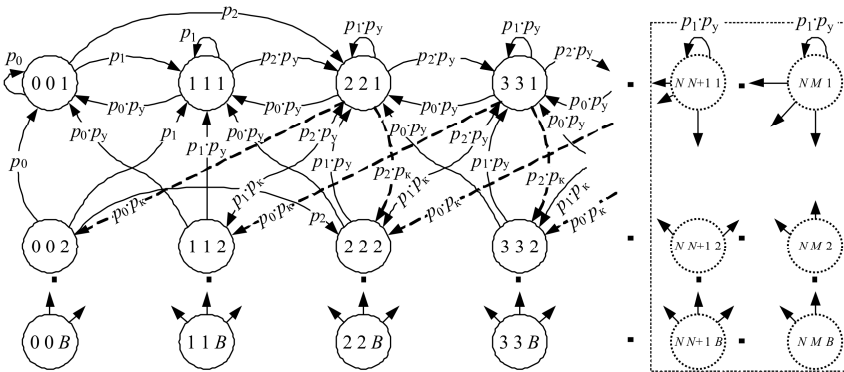


Рисунок 4 – Модель транспортной подсистемы ИУС LonWorks

Предложены способы учёта широкого спектра выделенных факторов функционирования автоматизированной ИУС с шиной LonWorks, в том числе ранее не анализируемые: сервисы доставки и свойствам им счётчики и таймеры передачи, индивидуальные интенсивности узлов и неоднородные параметры информационных сообщений, влияние человеко-машинной системы, – значимость и необходимость учёта которых подтверждена в ходе исследования их влияния на ВВХ системы.

Предложен способ количественной оценки ВВХ модели транспортной подсистемы, основанный на определении стационарных вероятностей состояний модели и применении полученных аналитических соотношений. Программная реализация построения и расчёта характеристик модели выполнена в системе MatLab, что подтверждается свидетельством регистрации.

Предложен способ композиции результатов оценки характеристик прикладной и транспортной подсистем автоматизированной ИУС LonWorks, учитывающий индивидуальные параметры коммуникационных взаимодействий узлов и позволяющий выполнять оценку основных ВВХ сбора, передачи и обработки технологической информации распределённой АСУТП.

Четвёртая глава работы посвящена построению имитационной модели функционирования и количественной оценке ВВХ ИУС с промышленной шиной LonWorks, а также подтверждению адекватности и корректности предлагаемых в работе моделей.

Выполнен анализ современных общецелевых и специализированных систем имитационного моделирования (СИМ): AnyLogic, GPSS, Ornet, NS2, Arena, MatLab и др., по предложенной системе критериев. Для разработки модели ИУС сделан выбор СИМ AnyLogic, как наиболее мощной системы разработки и исследования новых моделей распределённых систем.

Построение имитационной модели ИУС с fieldbus-системой LonWorks на основе агентного дискретно-событийного моделирования AnyLogic выполнено путём децентрализации сложного моделируемого процесса обработки и передачи информации по структурным элементам системы. Это позволило корректно и в полном объёме учесть реальный спектр факторов функционирования и структур модели автоматизированной ИУС: сегмент, шина данных, узел (рисунок 5), информационное сообщение, протокольные единицы данных. Метод агентного построения модели способствовал сокращению времени построения модели, по сравнению с процессным моделированием, и обеспечил гибкость и масштабируемость модели в исследованиях. Программная реализация модели подтверждается свидетельством регистрации.

Экспертная оценка результатов моделирования устанавливает корректность функционирования модели и результатов оценки ВВХ ИУС LonWorks.

Анализ адекватности предложенных в работе аналитической и имитационной моделей выполнен по отношению к широко используемой (эталонной) в научных публикациях модели, предложенной Р. Buchholz, J. Plonngs, учитывающей широкий, но, как показывают дальнейшие исследования, недостаточный перечень параметров функционирования ИУС. Выполнена оценка средних значений основных ВВХ и их отклонения от эталонных. Полученный результат отклонения ($\leq 6\%$) на широком диапазоне загрузки канала передачи информации подтверждает адекватность разработанных аналитической и имитационной моделей и возможность их применения при оценке запаздывания АСУТП и построении её инфраструктуры с требуемыми характеристиками.

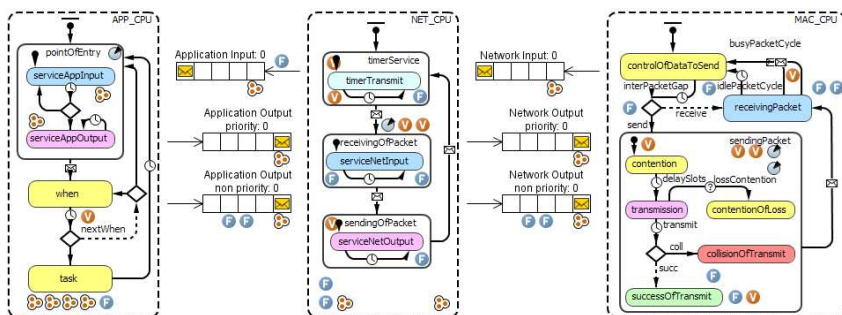


Рисунок 5 – Имитационная модель трёхпроцессорного узла ИУС LonWorks

Анализ корректности (функциональной адекватности) предложенных и существующих моделей выполнен аналогично исследованию адекватности, но с учётом свойственных моделям индивидуальных ограничений и учитываемых факторов. Эталонными приняты результаты разработанной наиболее функционально полной и адекватной имитационной модели. Сравнительный анализ результатов моделирования подтверждает корректность оценок ВВХ с использованием предложенной аналитической модели (отклонение 14 %), и выявляет недостаточную корректность известных моделей (отклонение более 46 %). Полученный результат подтверждает необходимость выбора и учёта в моделях значимых факторов функционирования для обеспечения точности оценки ВВХ. Впервые для ИУС предложена методика оценки значимости факторов, позволяющая решить указанную задачу и сократить размерность и вычислительную сложность расчёта моделей.

Пятая глава диссертационной работы посвящена разработке алгоритма проектирования автоматизированных ИУС с методами случайного множественного доступа CSMA, с требуемыми стоимостной и вероятностно-временными характеристиками сбора и обработки информации, обеспечивающими необходимое качество управления в распределённой АСУТП.

Анализ известных подходов к проектированию ИУС установил недостаточную проработанность вопроса построения инфраструктуры fieldbus-систем с алгоритмами случайного доступа. Использование недостаточно корректных моделей, отсутствие методов построения инфраструктуры системы с заданными ВВХ определяют проблемы низкой эффективности использования пропускной способности (недоиспользованности) распределённой ИУС, неэкономичности спроектированных вариантов системы.

Решение выделенных проблем осуществляется в предложенном алгоритме проектирования ИУС путём циклической реализации этапов (рисунок 6): 1) оценка вероятностно-временных и стоимостных характеристик; 2) контроль соответствия характеристик требованиям задания; 3) проектирование фрагмента промышленной шины.

Эффективность организации инфраструктуры РИУС обеспечивается применением разработанных аналитических и имитационной моделей и способов оценки ВВХ, характеризуемых индивидуальными преимуществами; процедур контроля характеристик и ограничений, определяющих конечность алгоритма; предложенных методов конфигурирования инфраструктуры с заданными ВВХ с учётом стоимости решений. Указанные особенности алгоритма способствуют устранению сформулированных проблем, сокращению времени проектирования и обеспечению требуемых ВВХ и стоимости проектируемой системы. Общий алгоритм проектирования дополнен частным спектром технических решений и алгоритмом их выбора для обеспечения требуемых ВВХ системы LonWorks.

Шестая глава посвящена апробации основных положений диссертации при проектировании инфраструктуры распределённой автоматизированной системы управления и противоаварийной защиты технологической установки гидроочистки дизельного топлива с промышленной шиной LonWorks, а также в учебном процессе в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Предложенный общий алгоритм адаптирован к проектированию информационно-управляющей системы с шиной LonWorks и характеризуется совокупным использованием, в определённой эффективной последовательности, разработанных адекватных аналитических и имитационной моделей системы и способов оценки их характеристик, а также применением методов конфигурации инфраструктуры с требуемыми по техническому заданию вероятностно-временными и стоимостными характеристиками, определяющими эффективность организации и необходимое качество управления АСУТП.

Выполнен анализ технического задания на проектирование полевой инфраструктуры АСУиПАЗ ТУГОДТ (рисунок 7) одного из ведущих предприятий нефтепереработки РФ, а также её существующей реализации ИУС с ши-

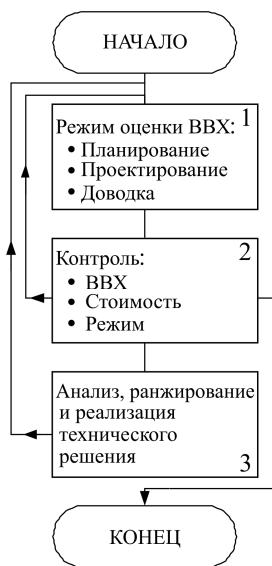


Рисунок 6 – Общий алгоритм построения инфраструктуры автоматизированной РИУС

ной LonWorks. Существующая инфраструктура системы включает шесть локальных сегментов разделённых пятью маршрутизаторами, 53 промышленных узла (контроллера), включающие 184 датчика и исполнительные механизмы.

Применение предложенного алгоритма проектирования позволило построить и реализовать инфраструктуру АСУиПАЗ на основе шины LonWorks с требуемыми стоимостной и ВВХ сбора и передачи информации, что обеспечило необходимое качество функционирования технологической установки с получением гидроочищенного топлива требуемого качества и количества. Применение предложенных моделей функционирования и методов проектирования позволило решить проблему недоиспользованности пропускной способности сегментов ИУС LonWorks, свойственную существующей инфраструктуре, и обеспечить: 1) сокращение стоимости распределённой инфраструктуры СУиПАЗ на 18 % за счёт уменьшения объёма коммуникационного оборудования системы; 2) снижение информационного запаздывания на участке АСУТП на 25 % за счёт объединения большего числа узлов в сегменте с высокой пропускной способностью, что способствовало уменьшению среднеквадратичного отклонения серосодержания целевого продукта за счёт более точного регулирования температуры в реакторе и деления фракций на блоке стабилизации. Полученные результаты подтверждаются актом внедрения и определяют корректность основных теоретических положений диссертации и эффективность разработанного алгоритма проектирования полевой инфраструктуры распределённой АСУТП.

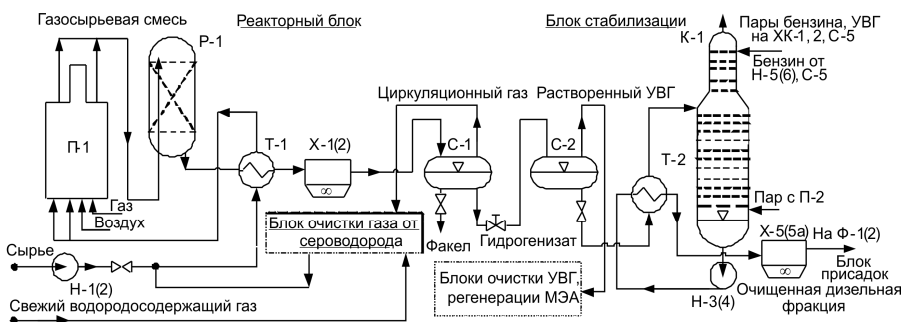


Рисунок 7 – Фрагмент технологической схемы установки гидроочистки топлива

Предложенные в диссертации модели распределённой автоматизированной ИУС LonWorks, способы оценки их характеристик, алгоритмы проектирования внедрены в учебный процесс в Пермском национальном исследовательском политехническом университете, в профильной дисциплине «Передача информации в распределённых информационно-управляющих системах» образовательной программы подготовки магистров по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах». Разработаны методиче-

ские указания к проведению лабораторных работ, посвящённых изучению принципов функционирования и анализу характеристик подсистем сбора и передачи информации, исследованию влияния параметров функционирования LonTalk на ВВХ, что способствует закреплению и формированию знаний и умений студентов в области построения инфраструктуры распределённой АСУТП с требуемым качеством управления.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований: разработанные имитационные и аналитические модели РИУС, способы количественной оценки ВВХ, полученные для системы LonWorks и обеспечивающие корректность результатов оценки. Показаны адекватность и эффективность применения предлагаемых моделей и методов проектирования в составе разработанного алгоритма построения инфраструктуры распределённых АСУТП с заданными ВВХ.

В приложениях приведены фрагменты листингов программных реализаций моделей и способов расчёта характеристик аналитических моделей прикладной и транспортной подсистем РИУС, документы, подтверждающие внедрение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы, в ходе которой решались поставленные задачи, можно сформулировать следующие основные выводы:

1. *Создана* модель автоматизированной РИУС, *учитывающая* наиболее полный спектр потенциально значимых протокольных и системных факторов функционирования системы LonWorks, в том числе ранее не анализируемых, учёт которых необходим для получения адекватных и корректных оценок ВВХ сбора, передачи и обработки информации в АСУТП.

2. *Предложен и применён* подход к разработке аналитической модели автоматизированной ИУС с промышленной шиной LonWorks, способ количественной оценки ВВХ и его программная реализация в системах MatLab и MathCad, *позволившие*, по сравнению с известными результатами, детализировать модель значимыми протокольными и системными факторами функционирования, что повысило адекватность результатов оценки запаздывания АСУТП.

3. *Выбрана* среда моделирования, и *построена* имитационная модель промышленной системы LonWorks, *учитывающая* наиболее полный спектр протокольных и системных факторов функционирования модели РИУС. *Выполнен* анализ и подтверждены адекватность и корректность предложенных аналитических и имитационной моделей функционирования и оценок ВВХ информационно-управляющей системы с шиной LonWorks.

4. *Построена и апробирована* на примере fieldbus-системы LonWorks методика количественной оценки значимости влияния на ВВХ факторов автоматизированной РИУС, *позволяющая* производить ранжирование значимых факторов с целью повышения корректности моделей и сокращения вычислительной сложности расчёта информационного запаздывания распределённой системы управления.

5. *Предложен* алгоритм проектирования распределённых информационно-управляющих систем с алгоритмами случайного доступа CSMA, *обеспечивающий* требуемое качество управления технологическими процессами, сбора и обработки информации с использованием разработанных методов оценки и обеспечения запаздывания.

6. *Реализован и апробирован* алгоритм проектирования инфраструктуры АСУиПАЗ ТУГОДТ на основе промышленной шины LonWorks, *позволивший обеспечить* требуемые ВВХ сбора, обработки и передачи информации, что определило необходимое качество функционирования системы противоаварийной защиты и системы управления технологической установки с получением гидроочищенного топлива требуемого качества и количества, а также *сократить* стоимость инфраструктуры на 18 % и *снизить* информационное запаздывание на участке АСУТП на 25 %, что *способствовало* уменьшению среднеквадратичного отклонения серосодержания целевого продукта.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Даденков, С.А. Подход к построению аналитической модели информационно-управляющей сети LonWorks на основе нейрочипов / С.А. Даденков, Е.Л. Кон // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2013. – № 11. – С. 64–69.

2. Даденков, С.А. Алгоритм проектирования промышленной информационно-управляющей сети требуемой производительности (на примере технологии LonWorks) / С.А. Даденков, Е.Л. Кон, А.А. Южаков // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 5 (24). – С. 35–43.

3. Даденков, С.А. Анализ моделей и методов агентного и дискретно-событийного имитационного моделирования / С.А. Даденков, Е.Л. Кон // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 5. – С. 35–41.

4. Даденков, С.А. Математические модели и количественная оценка времени задержки приложения узла в сенсорных сетях со случайным доступом / С.А. Даденков, Е.Л. Кон, А.А. Южаков // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2015. – № 3 (27). – С. 38–53.

5. Даденков, С.А. Общий алгоритм проектирования распределённых систем управления на основе нейрочипов с методом доступа CSMA / С.А. Даденков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2016. – № 8. – С. 24–31.

В других изданиях

6. Антинескул, А.В. Анализ временных задержек LonWorks-систем / А.В. Антинескул, С.А. Даденков, Е.Л. Кон // Научные исследования и инновации. – 2012. – Т. 6, № 1-4. – С. 239–248.

7. Даденков, С.А. Разработка корректной аналитической модели LonWorks-сети / С.А. Даденков, Е.Л. Кон // Материалы VI Всерос. мульти-конф. по проблемам управления. – 2013. – Т. 4. – С. 96–101.

8. Даденков, С.А. К вопросу построения корректных моделей функционирования LonWorks-сетей / С.А. Даденков, Е.Л. Кон // Современные проблемы математики и её прикладные аспекты: сб. тез. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 32.

9. Даденков, С.А. Разработка имитационной модели уровня приложений узла LonWorks-сети / С.А. Даденков, В.В. Чмыков // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы краев. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 278–282.

10. Даденков, С.А. Анализ значимости факторов коммуникационного стека протоколов LonTalk для разработки адекватных моделей LonWorks-сетей / С.А. Даденков // Тр. XII Всерос. совещ. по проблемам управления. – М., 2014. – С. 8527–8535.

11. Даденков, С.А. К вопросу анализа конфигурационных свойств узлов как фактора, влияющего на производительность сети LonWorks / С.А. Даденков, В.В. Чмыков // Научные труды Sworld. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 84–90.

12. Даденков, С.А. К проблеме анализа производительности промышленных сетей (на примере LonWorks) / С.А. Даденков, В.В. Чмыков // Научные труды Sworld. – 2014. – Т. 10, № 3. – С. 81–87.

13. Даденков, С.А. Имитационная модель промышленной сети (на примере технологии LonWorks) / С.А. Даденков, Е.Л. Кон, В.В. Чмыков // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. – Казань, 2014. – С. 82–84.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Анализ характеристик прикладной подсистемы обработки информации промышленной сети LonWorks: свидетельство № 2016615976 о гос. регистрации программы для ЭВМ, Рос. Федерация / С.А. Даденков, Е.Л. Кон. Оpubл. 20.07.2016.

2. Анализ характеристик промышленной сети fieldbus LonWorks: свидетельство № 2016615688 о гос. регистрации программы для ЭВМ, Рос. Федерация / С.А. Даденков, Е.Л. Кон. Оpubл. 20.06.2016.

3. Моделирование и анализ характеристик прикладной подсистемы обработки информации промышленной сети LonWorks: свидетельство № 2016615615 о гос. регистрации программы для ЭВМ, Рос. Федерация / С.А. Даденков, Е.Л. Кон, В.В. Чмыков. Оpubл. 20.06.2016.

4. Моделирование и анализ характеристик промышленной сети fieldbus LonWorks: свидетельство № 2016615875 о гос. регистрации программы для ЭВМ, Рос. Федерация / С.А. Даденков, Е.Л. Кон, В.В. Чмыков. Оpubл. 20.06.2016.