

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

---

На правах рукописи



Аббас Саддам Ахмед Мохаммед

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ СБОРА И  
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы и  
компьютерные сети

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», на кафедре вычислительной техники.

Научный руководитель: **Водяхо Александр Иванович**  
доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

**Официальные**  
**оппоненты:** **Легалов Александр Иванович**  
доктор технических наук, профессор департамента программной инженерии, факультета компьютерных наук НИУ ВШЭ, г. Москва.

**Мутханна Аммар Салех Али**  
кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:** **ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»**, г. Калининград.

Защита состоится «21» сентября 2022 г. в 17-00 часов на заседании на заседании диссертационного совета Д 212.238.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5 Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «30» июня 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.01,

к.т.н., доцент

Пазников А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Успехи в области технологии, в частности в таких областях как нанотехнологии, телекоммуникации, программная инженерия позволило создавать системы принципиально нового уровня сложности. При этом уровень сложности создаваемых систем во многом определяется такими факторами, как число уровней иерархии и уровнем интеллекта. Кроме того, постоянно повышается уровень структурной динамики и использования динамических бизнес-процессов (БП). Начинает набирать силу тенденция к использованию когнитивных систем.

Расширение номенклатуры доступных для разработчика технологий и инструментария приводит к появлению таких тенденций как:

- появление новых парадигм построения, информационно-ориентированных системы (ИОС), большинство из которых являются интеграционными и базируются на нескольких существующих парадигмах;
- постоянно расширяется сфера применения ИОС, причем в значительной степени это происходит за счет систем низкого ценового уровня;
- системы строятся не только из программных компонентов, а включают также компоненты другой физической природы, в частности, людей;
- создаваемые системы становятся все более сложными и динамичными.

Наиболее часто при построении современных ИОС используются такие парадигмы как Интернет вещей, промышленный Интернет вещей, туманные вычисления, киберфизические системы (КФС), социо-кибернетические системы и системы окружающего интеллекта.

Системы нового поколения создаются для решения самых разнообразных задач, в частности, задач управления, сбора данных для последующего их анализа. Решение всех этих задач требует реализации процедур сбора данных о состоянии наблюдаемых систем (НС) в целях поддержания НС в работоспособном состоянии и/или оптимизации функционирования. Под НС в данном случае понимается КФС, которая является источником данных.

Организация эффективных процедур сбора данных в многоуровневых распределенных системах с высоким уровнем структурно-функциональной динамик, построенных по принципу системы систем, когда большое число категорий пользователей одновременно решают собственные задачи по сбору и обработке данных, является сложной научно-технической проблемой, решение которой с использованием существующих подходов не представляется возможным, и требуется разработать новые подходы к построению систем сбора данных, ориентированные на использование в КФС с высоким уровнем архитектурной динамики.

Модельный подход в настоящее время находит самое широкое применение в современных ИОС на разных этапах жизненного цикла, в частности для решения задачи интеграции гетерогенных систем и для решения задачи сбора данных. При построении крупномасштабных гетерогенных ИОС в настоящее время активно используются две взаимосвязанные парадигмы: цифровые двойники и цифровые нити, которые можно рассматривать как возможные подходы к реализации механизмов виртуализации. Кроме того, следует отметить такие подходы к проектированию информационных систем как гибкие архитектуры (agile architecture) и непрерывная (continuous) архитектура.

Анализ показывает, что в настоящее время отсутствуют действенные подходы к решению задачи сбора данных в сложных распределенных КФС.

**Степень разработанности темы исследования.** Сформулированная в диссертации проблема была решена посредством использования концепций, принципов и подходов, используемых в теории вычислительных систем, теории вычислительных процессов, системном анализе, инженерии требований, инженерии знаний и теории искусственного интеллекта.

В работе используются результаты, полученные как отечественными и зарубежными исследователями, среди которых можно назвать Поспелова Д.А., Юсупова Р.М., Соколова Б.В., Охтилева М.Ю., Советова Б.Я., а также зарубежных ученых и специалистов: Аальста В., Дюма М., Блаша Е., Месаровича М., Такахару Я., Люгера Д.Ф., Норвига П., Л. Рассела С., Басса Л., Розанского Н. и др.

Таким образом, можно утверждать, что исследование вопросов разработки принципов построения систем сбора данных в гетерогенных КФС, характеризующихся высоким уровнем структурной, функциональной и архитектурной динамики, является актуальной и отвечает современным и перспективным потребностям практики.

**Цель исследования:** Разработка принципов построения и реализации систем сбора данных (ССД), ориентированных на использование в КФС, с высоким уровнем структурной и функциональной динамики, построенных на платформах туманных вычислений.

**Задачи исследования:** В работе формулируются следующие задачи:

1. Анализ возможных подходов и разработка общих принципов построения ССД, разработка концептуальных моделей процесса сбора данных, ориентированных на использование в КФС, реализованных на туманных платформах.

2. Разработка концептуальной (обобщенной) и частных моделей НС.

3. Разработка принципов управления процессами сбора данных, ориентированных на использование в КФС, построенных на туманных платформах.

4. Разработка общей и частных методик архитектурного проектирования ССД, ориентированных на использование совместно и в составе КФС, построенными на туманных платформах.

**Объект исследования:** Архитектура, организация и проектирование ССД, ориентированных на использование в составе крупномасштабных КФС с высоким уровнем структурно-функциональной динамики, реализованных на платформах туманных и граничных вычислений вычислений.

**Предмет исследования.** Общие, частные модели, используемые в ССД, ориентированных на функционирование в составе сложных КФС с высоким уровнем структурно-функциональной динамики, построенные на платформах туманных вычислений, а также алгоритмы функционирования указанных систем, в частности, алгоритмы синтеза моделей, а также принципы построения распределенных систем сбора данных, ориентированных на сбор данных в КФС, реализованных на платформах туманных вычислений.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались теория вычислительных систем, теория вычислительных процессов, системный анализ, инженерии требований, программной инженерии и инженерии знаний.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Подход к построению ССД в КФС, построенных на туманных платформах, основанный на использовании моделей НС.
2. Концептуальная (обобщенная) и частные модели, описывающие динамическую структуру и поведение НС.
3. Методы автоматического построения процедур сбора данных, ориентированные на использование в КФС, построенных на туманных платформах, основанные на использовании модельного знания.
4. Методики архитектурного проектирования ССД в КФС, построенных на туманных платформах, основанные на использовании модельного знания.

**Научная новизна.** Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов базируется на идее использования многоуровневой динамической графовой полимодели в качестве хранилища накопленных данных, полученных в результате функционирования скриптов, реализующих процедуры сбора данных. В процессе функционирования ССД модель и скрипты строятся и поддерживаются в актуальном состоянии автоматически. Научная новизна отдельных результатов состоит в следующем:

1. Новизна предлагаемого подхода к построению ССД состоит в том, что в основу развиваемого подхода положено использование модели НС, построение которой рассматривается как конечная цель процесса сбора данных.
2. Новизна разработанной двухуровневой концептуальной модели НС состоит в том, что на верхнем уровне НС описывается в терминах архитектурных состояний, что позволяет описывать различные гибкие (agile) архитектуры. Для этого предлагается использовать многоуровневые относительно конечные автоматы. Нижний уровень является доменно-ориентированным. Модели данного уровня выбираются исходя из того, какие

данные требуется собирать. В данной работе в качестве модели нижнего уровня используется графовая модель, описывающая НС в терминах потока управления, потока данных, потока запросов и структурного графа. Эта модель позволяет представлять собранные данные в терминах графа свойств. На базе данной общей модели можно строить частные модели, например только граф потока данных, потока управления или ресурсный граф.

3. Новизна подхода к организации процесса сбора данных состоит в том, что для его реализации предлагается использовать оригинальную виртуальную машину, которая обеспечивает построение модели НС, и поддержания ее в актуальном состоянии, а также формирование скрипта, отвечающего за сбор данных. Новизна данного результата определяется новизной подхода и новизной модели, а также оригинальностью архитектуры предложенной виртуальной машины.

4. Новизна разработанного подхода к проектированию ССД и частных методик проектирования ССД состоит в специфике набора функций, реализуемых ССД и спецификой развиваемого подхода к построению ССД, основанного на использовании разработанной модели НС. Предлагаемую методику можно рассматривать как адаптацию известных подходов к проектированию ИОС, ориентированную на решение задач проектирования ССД.

#### **Практическая ценность.**

1. Практическая ценность предлагаемого подхода к построению ССД состоит в том, что указанный подход может быть использован для сбора данных в крупномасштабных ИОС с высоким уровнем структурно-функциональной динамики, в частности данный подход может быть использован при построении цифровых двойников, в системах сбора и анализа данных и системах управления сложными распределенными ИОС.

2. Практическая ценность разработанной двухуровневая концептуальной модели НС состоит в том, что ее использование позволяет представлять собранные данные в форме графа, который может быть использован различными заинтересованными сторонами для извлечения требуемой информации.

3. Практическая ценность подхода к организации процесса сбора данных состоит в том, что его реализация позволяет строить эффективные процедуры сбора данных в распределенных гетерогенных средах с постоянно изменяющейся структурой и поведением.

4. Практическая ценность разработанного подхода к архитектурному проектированию ССД и частных методик проектирования ССД состоит в том, что данный подход может быть использован архитекторами, при решении реальных задач в различных предметных областях, позволяет сократить время и стоимость проектирования.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность основных теоретических результатов обеспечивается за счет того, что они базируются на известной теории, в частности, аппарата синтеза многоуровневых конечных автоматов и теории восстановления БП по лог-файлам (Process

Mining). Кроме того, достоверность полученных научных результатов может быть подтверждена результатами моделирования и результатами внедрения и эксплуатации внедренных систем.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационного исследования используются в исследованиях, разработках и учебном процессе:

- в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);
- в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете (ИТМО);
- в Санкт-Петербургском Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук».

Внедрения результатов диссертационной работы подтверждены актами.

**Соответствие паспорту специальности.** Исследование выполнено по специальности 05.13.15 Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети и соответствует следующим пунктам её паспорта:

Первый результат соответствует пункту 1 паспорта специальности: «1. Разработка научных основ создания вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, исследования общих свойств и принципов функционирования вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей». Результаты 2 и 3 соответствуют пункту 4 паспорта специальности: «4. Разработка научных методов и алгоритмов организации параллельной и распределенной обработки информации, многопроцессорных, многомашинных и специальных вычислительных систем». Результат 4 соответствует пункту 6 паспорта специальности: «6. Разработка научных методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

#### **Личный вклад.**

Автором диссертационной работы самостоятельно рассмотрены возможные подходы, разработан подход к построению ССД в КФС, реализованных на туманных платформах, основанный на использовании моделей НС, концептуальная и частные модели, описывающие динамическую структуру и поведение НС, разработаны основы общей методики проектирования и частных методик проектирования ССД, ориентированных на совместное использование с КФС, построенными на туманных платформах. Основные результаты работы получены автором и представлены им в научных публикациях. Автор лично представлял результаты исследований на конференциях.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на 13 международных, национальных и региональных научных конференциях:

- The 11-th Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems, (MICSECS 2019) Saint Petersburg, December 12-13, 2019 г.
- XXIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). Санкт-Петербург. 27–29 мая 2020 г.;
- 9-th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 8-11 June 2020;
- IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS) Varna, Bulgaria. August 28-30, 2020;
- XVII Санкт-Петербургской международной конференции, Региональная информатика (РИ-2020), Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020.
- Конференция «информационные технологии в управлении» (ИТУ-2020), 6–8 октября 2020, Санкт-Петербург;
- XXVI международной научно-методической конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество" 29 сентября 2020 г.;
- Conference DTGS (Digital Transformation & Global Society), St. Petersburg, Russia, June 24-26, 2020;
- 13th Multi conference on Control Problems (MCCP 2020) 6-8 October 2020, Saint Petersburg, Russia;
- the XII Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems 2020 (MICSECS-2020). 10-11 December 2020. Saint Petersburg, Russia;
- XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 26-28 May 2021. Saint Petersburg, Russia;
- XXVIII международная научно-методическая конференция "современное образование: Содержание, технологии, качество" 14 апреля 2022 г. Россия, Санкт-Петербург;
- XXV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2022). 25 - 27 мая, 2022.

**Публикации.** Полученные основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования опубликованы в 26 трудах, в том числе в 6 научных статьях в журналах, рекомендуемых ВАК к опубликованию основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 10 научных статьях, опубликованных в зарубежных журналах, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, 10 публикациях в сборниках конференций, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений и терминов, списка использованных источников, содержащего 214 наименования и 2 приложения. Объем работы составляет 195 страниц, включая 46 рисунков и 9 таблиц.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, формулируется проблема сбора данных и обеспечения наблюдаемости в распределенных КФС, построенных на платформах туманных вычислений, определены цели и основные задачи исследования, формулируются научная новизна и практическая значимость полученных результатов работы. Приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводятся результаты анализа современных подходов к построению систем сбора данных в крупномасштабных распределенных КФС. Формулируется проблема и предлагается подход к ее решению.

Проведенный анализ специфики современного этапа развития информационных технологий показывает, что в основу построения современных и особенно перспективных ИОС наиболее часто используются такие парадигмы, как туманные вычисления, интернет вещей, промышленный интернет вещей, КФС, мультиагентные системы, системы окружающего интеллекта, когнитивные системы. Новые концепции и парадигмы часто базируются на уже известных принципах и технологиях и в значительной степени, пересекаются и дополняют друг друга. Значительная часть современных интеллектуальных распределенных систем представляют собой КФС, построенные на базе туманных платформ и могут быть отнесены к классу сложных систем. В настоящее время все более широкую популярность приобретает практика построения КФС на туманных платформах.

КФС нового поколения создаются для решения самых разнообразных задач, в частности, разного рода задач управления, сбора данных для последующего их анализа. Решение всех этих задач требует реализации процедур сбора данных.

При этом разработчик сталкивается с большим числом ограничений, основными из которых являются невозможность организовать эффективный процесс сбора данных в условиях, когда НС имеет сложную постоянно изменяющуюся структуру и реализует сложное поведение, т.е. характеризуется высоким уровнем структурно-функциональной динамики, особенно если при этом требуется представлять собранную информацию разным пользователям в разной форме.

Решить задачу наблюдаемости с использованием существующих подходов не представляется возможным, и требуется разработать новые подходы к построению систем сбора данных, ориентированные на использование в КФС с высоким уровнем структурно-функциональной динамики.

Идея развиваемого подхода к построению ССД в туманных средах состоит в использовании динамических моделей, в которых аккумулируется знание о текущем состоянии НС и состоит в следующем: 1) строится система моделей, описывающая структуру и поведение НС; 2) актуальность модели поддерживается с использованием информации, поступающей от НС в форме логов; 3) все запросы всех заинтересованных сторон осуществляются только

к моделям, если требуемая информация не может быть получена из модели, то модель достраивается.

Использование данного подхода применительно к крупномасштабным КФС позволяет: 1) оперативно отслеживать динамику структуры и поведения НС, состоящей из элементов разной физической природы, включая людей, т.е. строить цифровые двойники элементов НС; 2) уменьшить время отклика на запросы пользователей о состоянии НС; 3) оперативно получать данные о прошлых состояниях и в определенных пределах предсказывать поведение НС; 4) накапливать знания о НС. Для того чтобы указанный положительный эффект может быть получен, модель должна обладать следующими свойствами: 1) описывать структуру и поведение НС разумной сложности с иерархической структурой; 2) отвечать на требуемые запросы разных категорий пользователей; 3) должна обеспечиваться возможность автоматического построения модели; 4) модель должна иметь приемлемую сложность, поскольку является моделью времени выполнения (run time).

**Во второй главе** рассматриваются общие принципы построения ССД, ориентированных на использование в распределенных КФС, построенных на туманных платформах и рассматриваются модели, описывающие структуру и поведение НС. Задача сбора данных формулируется в терминах восьми классов сущностей  $DAS = \langle SH, Obs, DASS, DSLRQ, DSLRS, POL, SCR, LOGS \rangle$ , где  $SH$  – множество наблюдателей (заинтересованных сторон, Stakeholders, SH),  $Obs$  – НС, Observed System,  $DASS$  – подсистема сбора данных (DA Subsystem),  $DSLRQ$ ,  $DSLRs$  – множество запросов и множество ответов, сформулированных на доменно-ориентированном языке (Domain Specific Language, DSL),  $POL$  – множество политик,  $SCR$  – множество скриптов,  $LOGS$  – множество лог-файлов или просто логов.

Решение задачи сбора данных в рассматриваемой постановке предполагает решение 2 основных подзадач: формирование и представление запросов на сбор данных и представление результатов в терминах языка пользователя (Domain Specific Language, DSL). Первая задача предполагает выполнение трансформаций  $DSLRQ \rightarrow V_u$  и  $V_k \rightarrow DSLRS$ , где  $V_u$  исходный вектор значений, которые должны быть определены в результате реализации процедуры сбора данных, а  $V_k$  – конечный вектор значений.  $DSLRQ$  и  $DSLRs$  – это запросы и ответы на языках пользователей. Вторая задача предполагает трансформацию  $V_u \rightarrow V_k$  или  $V_k = f(V_u, ObsP)$ , где  $ObsP$  – параметры НС.

В качестве модели, описывающей НС, предлагается использовать двухуровневую полимодель. На верхнем уровне для описания НС используется многоуровневый конечный автомат (МКА), который описывает функционирование НС в терминах переходов между архитектурными состояниями (АрС) под действием внутренних и/или внешних событий, в НС. Автомат работает в дискретном пространстве и дискретном времени, множество допустимых параметров, в общем случае, конечны только на интервале одного шага поведения, т. е. это автомат с переменной структурой, у которого функции переходов и выходов явным образом зависят от времени,  $A_{i+1} = F(A_i, t)$  или  $A = (X(t), Y(t), S(t), T(t), s_0)$ . Модель верхнего уровня

позволяет описывать различные механизмы архитектурной вариабельности, например, динамические архитектуры.

На нижнем уровне каждому состоянию рассматриваемого автомата ставится в соответствие архитектурное состояние ( $ArC$ ), которое может быть определено различными способами в зависимости от цели сбора данных. Если целью сбора данных является получение информации о структуре и поведении НС, то архитектурное состояние можно определить, как  $ASt = \langle MS, MB \rangle$ , где  $ASt$  архитектурное состояние,  $MS$ - структурная модель,  $MB$  - модель поведения, автомат меняет свое состояние под действием внутренних или внешних событий. В определенном смысле архитектурное состояние можно представить в виде структуры данных, например, структуры типа графов разметки свойств (Labelled Property Graph, LPG), которая используется для накопления собранных данных.

В основу модели, описывающей  $ArC$ , положен граф потока данных, определяющий зависимости по данным. При этом в качестве условий готовности оператора к выполнению кроме наличия данных требуется наличие запроса на его выполнение, сигнала, предписывающего выполнение оператора и готовность ресурса к выполнению оператора. Готовность данных определяются по приходу данных от других операторов. Запросы и сигналы, предписывающие начать выполнение оператора генерируются устройством управления. Имеющиеся ресурсы описываются отдельным графом. Информация о состоянии ресурсов также поступает на входы операторов. Данный граф является мета моделью, на базе которой могут строиться частные модели.

Для работы с описанной моделью была предложена виртуальная машина, которая состоит из 4 асинхронно функционирующих процессоров (автоматов): процессора логов, процессора моделей, процессора скриптов и политик, процессора доменно-ориентированного языка (DSL процессора) и репозитария. Все перечисленные элементы являются распределенными. В работе приводятся разработанные алгоритмы формирования процедуры сбора данных. Предложено типовое распределение процессоров и моделей по уровням эталонной модели КФС.

**В третьей главе** рассматриваются базовые архитектурные решения распределенных ССД данных и способы построения процедур сбора данных. Множество типовых архитектурно-структурных решений ( $TACP$ ) ССД можно определить, как  $\langle TACP \rangle = \langle Назначение \rangle \times \langle Тип обработки \rangle \times \langle Размещение \rangle \times \langle АЗП \rangle$ , где  $TACP$  - типовые архитектурные решения, а  $АЗП$  - архитектурно-значимые параметры. В рамках предлагаемого подхода к построению процесса сбора данных ключевым понятием является понятие политики, которое определяется как набор правил, которые используются для управления и контроля изменения и/или поддержания состояния одного или нескольких управляемых объектов. Более формально политику можно определить следующим образом  $POL = \langle GOAL, RULESET \rangle$ , где  $GOAL$  - цель, а  $RULESET$  упорядоченный набор правил для достижения цели.

Политика определяется как цель и способ ее достижения. Политика является многоуровневым понятием. На каждом уровне реализуется свой набор политик. Политику  $i$ -го уровня можно определить как  $\langle POL_{ij} \rangle ::= \langle GOAL_{i+1} \rangle \langle \{SubGOAL_i\} \rangle \langle Fusion Procedure_i \rangle$ , где  $POL_{ij}$  -  $j$ -я политика  $i$ -го уровня,  $GOAL_{i+1}$  – цель,  $SubGOAL_i$  - набор подцелей,  $Fusion Procedure_i$  - ссылка на процедуру слияния DIK.

Термин "контекстно-зависимые политики" (Context Aware Policies, CAP) можно определить, как политики, на реализацию которых может влиять состояние контекста. Использование контекстов позволяет сделать механизм политик более гибким.

Предложен подход к реализации механизма контекстно-зависимые политик с помощью распределенной виртуальной машины, включающей свой состав процессор политик и скриптов, репозитарий политик и правил и репозитарий моделей.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы архитектурного проектирования, предлагается методика архитектурного проектирования и рассматриваются примеры ее использования для разных вариантов постановок задач проектирования ССД.

В общем виде задача проектирования формулируются следующим образом. Путем использования процедуры синтеза (проектирования)  $S$  найти многоуровневую архитектурную модель  $A$ , для которой достигается экстремум основного показателя эффективности многоуровневого синтеза при ограничениях на вспомогательные показатели.

$$M: A0 = Argextr W(S(Av), M(Av)), \quad (1).$$

где  $A0$  - требуемая архитектура,  $W$  - основной показатель эффективности,  $M$  - вспомогательные показатели  $v \in V$  - множество возможных архитектур. В данном случае в качестве архитектуры выступает  $ArC$ ,  $Av$  - множество возможных архитектурных решений. Основному показателю эффективности может быть поставлена в соответствие архитектурная тактика. Выражение (1) описывает процесс проектирования на верхнем уровне. В самом деле, число уровней обычно равняется 6 (по числу уровней эталонной КФС). Каждому из уровней соответствует свой набор  $ArC$ , в общем случае для одной и той же архитектуры верхнего уровня могут использоваться разные основные показатели эффективности. Таким образом, для всех уровней кроме верхнего, можно записать:

$$A_i = Argextr W_i(S_i(Av), M(A_i v)), \quad i=1,4 \quad (2).$$

Если принять о внимание тот факт, что в процессе проектирования реализуемая функциональность постоянно перераспределяется между уровнями, то понятно, что взаимосвязь между уровнями могут быть достаточно сложными.

В работе рассматриваются частные постановки задач проектирования.

Можно выделить следующие типовые варианты постановки задачи проектирования систем рассматриваемого класса:

$$\begin{aligned} TCO \rightarrow \min, \text{ при } P > P_{треб}, AV > AV_{треб}, \Phi B = \Phi B_{треб} \text{ FoR} > FoR_{треб}, \\ P \rightarrow \max, \text{ при } \Phi B = \Phi B_{треб}, AV > AV_{треб}, TCO > TCO_{треб}, \text{ FoR} > FoR_{треб}, \end{aligned}$$

$AV \rightarrow \max$ , при  $\Phi B = \Phi B_{\text{треб}}$ ,  $AV > AV_{\text{треб}}$ ,  $TCO > TCO_{\text{треб}}$ ,  $FoR > FoR_{\text{треб}}$ ,

$FoR \rightarrow \max$ , при  $\Phi B = \Phi B_{\text{треб}}$ ,  $AV > AV_{\text{треб}}$ ,  $TCO > TCO_{\text{треб}}$ ,

где  $P$  - производительность (эта характеристика обычно встречается в форме время отклика или число обрабатываемых запросов),  $AV$  - надежность, чаще всего выступает в форме доступности,  $FoR$  - свобода от рисков. Реже встречаются постановки типа:

$SEQ \rightarrow \max$ , при  $\Phi B = \Phi B_{\text{треб}}$ ,  $AV > AV_{\text{треб}}$ ,  $TCO > TCO_{\text{треб}}$ ,

$T2D \rightarrow \max$ , при  $TCO > TCO_{\text{треб}}$ ,  $\Phi B = \Phi B_{\text{треб}}$ ,  $AV > AV_{\text{треб}}$ ,

где  $SEQ$  - требования по безопасности,  $T2D$  - время разработки.

Могут встречаться и другие постановки.

Рассмотрены три примера использования предлагаемого подхода при проектировании ССД: производственная система, системы мониторинга сетей кабельного телевидения и система формирования индивидуальных образовательных траекторий.

В первом случае рассматривается производственная система, с мобильными сущностями на сенсорном уровне, построенная на платформе промышленного интернета вещей. В этой задаче присутствует две ключевые подзадачи: сбор данных на сенсорном уровне в условиях очень высокого уровня электромагнитных помех и построения корпоративного графа знаний.

Использование модельного подхода на нижнем уровне позволило сократить объем трафика и уменьшить время отклика, использование моделей высокого уровня позволило повысить гибкость и упростить процесс интеграции в корпоративную информационную систему.

Вторая задача, связанная с построением системы мониторинга сетей кабельного телевидения. В этом проекте решается задача технического обслуживания сложной распределенной системы и модели поведения не используются. При решении данной задачи оказывается возможным ограничиться только моделями структурной динамики.

В третьем случае модельный подход используется для решения задачи построения образовательных траекторий. Это задача синтеза БП на основе модели. Данная задача также интересна тем, что образовательные системы можно рассматривать как одну из разновидностей социо-кибернетических систем. Это указывает на возможность при определенной доработке, связанных с адаптацией модели, использовать данный подход для решения задач сбора данных в социо-кибернетических системах, например, социальных сетях.

**В заключении** сформированы основные результаты диссертационного исследования.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Разработаны подходы к решению научной проблемы разработки основ теории построения ССД, ориентированных на использование в распределенных КФС с высоким уровнем структурно-функциональной динамики, построенных на платформах туманных вычислений.

Ключевая идея развиваемого подхода состоит в использовании динамических моделей НС, которая поддерживается в актуальном состоянии посредством обработки потока событий, поступающих в форме логов. Ключевым требованием, предъявляемым к модели, является ее синтезируемость в процессе функционирования и возможность ее использования для выполнения запросов разных категорий пользователей.

**В результате выполнения работы получены следующие научные и практические результаты.**

1. Предложен полимодельный подход к построению ССД, в основу которого положено использование модели НС. Принципиально могут использоваться разные модели. Рассматриваемая модель описывает НС в терминах динамической структуры и динамических БП. В качестве модели верхнего уровня предлагается использовать многоуровневый относительно конечный автомат, каждому состоянию которого ставится в соответствие архитектурное состояние, которое описывается с помощью модели, которая представляет НС с помощью 4 графов: графа потока данных, графа потока управления, графа потока запросов и ресурсного графа. Данная модель рассматривается как мета-модель, на базе которой строятся множество частных моделей. Для автоматического построения этих моделей могут использоваться алгоритмы структурного синтеза и модифицированные алгоритмы Process Mining.

2. Разработаны обобщенная и частные структурно-функциональные модели НС, а также разработаны принципы реализации ССД применительно к разным постановкам задач. Предложена концептуальная структура ССД, которая состоит из 4 асинхронно функционирующих виртуальных машин (процессоров): процессора лог-файлов, процессора моделей, процессора скриптов и политик, процессора доменно-ориентированного языка (DSL процессора) и репозитория. Все перечисленные элементы являются распределенными. Разработаны обобщенные алгоритмы функционирования ССД. Предложено типовое распределение процессоров и моделей по уровням НС.

3. Разработаны принципы управления процессами сбора данных, ориентированных на использование в КФС, построенных на туманных платформах.

Рассмотрены механизмы работы с политиками применительно к ССД. Процедура сбора данных реализуется посредством выполнения скрипта. Использование механизма политик позволяет управлять процессом сбора данных с помощью системы правил, при этом правила могут формулироваться в бизнес терминах. Для реализации политик предложен процессор политик и скриптов, который представляет собой представляет собой распределенный процессор. Рассмотрены алгоритм функционирования данного процессора.

Проанализирована возможность использование контекстов при построении ССД. Рассмотрены возможности использования контекстно-зависимых политик применительно к ССД для КФС. Предложен процессор

контекстно-управляемых политик. Определен типовой набор операций для работы с политиками и контекстами. Определены типовые способы представления контекстов.

Рассмотрены возможные подходы к обработке потока событий применительно к ССД для работы в КФС. При работе с большим числом датчиков, образуются потоки событий и появляются проблемы, связанные с тем, что, на сенсорном уровне требуется буферизировать большие объемы данных, поступающих в форме лог-файлов, поскольку, пересылать их на туманный уровень проблематично по причине ограничений на пропускную способность каналов связи. Эта задача решается с помощью механизма композитных событий, которое создается путем объединения набора других простых или сложных событий с использованием набора конструкторов. Предложена типовая структура системы обработки формирования композитных событий. Распределенный процессор лог-файлов может быть достаточно эффективно реализован с использованием существующих фреймворков и технологий, и для реализации предлагаемого подхода в этом плане не требуется специальных разработок.

4. Разработаны основы общей методологии проектирования и частных методик проектирования ССД, ориентированных на совместное использование с КФС, построенными на туманных платформах. Разработаны обобщенные подходы к проектированию ССД. Определены показатели качества ССД. Показатели качества (характеристики) предлагается разделить на характеристики НС, которые являются значимыми с точки зрения ССД и характеристики собственно ССД. К основным, значимым с точки зрения сбора данных, характеристикам НС можно отнести следующие характеристики: сложность, быстрдействие, объем собираемых данных, динамичность структуры и поведения, защищенность, доступность, расширяемость, сопровождаемость. К основным значимым характеристикам ССД можно отнести следующие характеристики: функциональное соответствие, эффективность, свобода от рисков, гибкость, надежность, производительность, защищенность, доступность, сложность, расширяемость, совокупная стоимость владения.

Сформулированы типовые постановки задач проектирования ССД, ориентированные на использование в КФС. Предложена типовая последовательность принятия решений на архитектурном этапе проектирования ССД, ориентированных на использование в КФС. В рамках этого процесса определены типовые архитектурные тактики. Определены механизмы управления вариабельностью.

Рассмотрены три примера использования предлагаемого подхода при проектировании ССД: производственная система, системы мониторинга сетей кабельного телевидения и система формирования индивидуальных образовательных траекторий.

**Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования.**

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в перспективных научно-исследовательских работах и опытно-конструкторских и технологических работах, а также в учебном процессе при подготовке специалистов, связанных с проблемами построения КФС разного назначения. Дальнейшие исследования по тематике диссертации целесообразно проводить в направлении расширения сферы применения, развиваемого подхода.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

- 1- А.И. Водяхо, Н. А. Жукова, С. А. Аббас, М.А. Червонцев. Мульти модельный подход к построению систем мониторинга // В журнале известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2019, выпуск 7, стр 5-13. [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-7\\_2019-2\\_p005-013\(10\).pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-7_2019-2_p005-013(10).pdf).
- 2- С.А. Аббас. Модели бизнес-процессов для систем мониторинга //Журнал «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» Выпуск № 8-9 2020 года, стр 61-65. [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-8-9\\_2020-61-65.pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-8-9_2020-61-65.pdf).
- 3- С. А. Аббас, А.И. Водяхо, Н. А. Жукова, М.А. Червонцев. // Об одном подходе к построению систем сбора данных в киберфизических системах, построенных на платформах туманных вычислений // Журнал «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» 2020 выпуск 7 стр 5-14. [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-7\\_2020-5-14.pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-7_2020-5-14.pdf).
- 4- С. А. Аббас, В. В. Чернокульский, Аунг Мьо То, Н. А. Жукова. Средства моделирования динамических сетей интернета вещей //Журнал «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» 2020 выпуск 7 стр 62-69. [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-7\\_2020-62-69.pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-7_2020-62-69.pdf)
- 5- Аунг Мьо То, Аббас Саддам Ахмед, Жукова Наталия Александровна, Чернокульский Владимир Викторович. // Модели управления процессами сбора данных в сетях интернета вещей с динамической структурой средствами вычислительных систем// журнал: Computational nanotechnology, Выпуск №3 2020 г. стр 62-71, [10.33693/2313-223X-2020-7-3-62-71](https://doi.org/10.33693/2313-223X-2020-7-3-62-71)
- 6- С. А. Аббас, А.И. Водяхо, Н. А. Жукова, // Архитектурное проектирование киберфизических систем, построенных на платформах интернета вещей // Журнал «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» 2021 выпуск 6 стр 35-45. [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-6\\_2021-35-45.pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-6_2021-35-45.pdf)

### Публикации, входящие в перечень изданий базы Scopus и Web of Science

- 7- S. A. Abbas, A. I. Vodyaho, N.A. Zhukova and M.A. Chervontsev // Solving data collection tasks in heterogeneous distributed software intensive system using model approach // Journal of Physics: Conference Series, // <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012082>
- 8- T. Man, N.A. Zhukova, A.M. Thaw, S.A. Abbas. A decision Support System for DM Algorithm Selection Based on Module extraction// Procedia Computer Science 186 (2021) 529–537 <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.173>
- 9- Alexander Vodyaho, Saddam Abbas , Nataly Zhukova and Michael Chervoncev. Model Based Approach to Cyber–Physical Systems Status Monitoring // Computers 2020, 9(2), 47; [10.3390/computers9020047](https://doi.org/10.3390/computers9020047)
- 10- Michael Chervontsev, Saddam Abbas, Alexander Vodyaho, Natalia Zhukova. Towards monitoring systems development on the basis of the multilevel relative finite state operational automata// The 11th Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85083191794&partnerID=MN8TOARS>



- 11- Alexander Vodyaho; Abbas Saddam Ahmed; Nataly Zhukova; Aung Myo Thaw. Cluster - Oriented Model for Data Collection in Mobile IoT Networks. //2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 8-11 June 2020. [10.1109/MECO49872.2020.9134366](https://doi.org/10.1109/MECO49872.2020.9134366)
- 12- N. A. Zhukova, A. I. Vodyaho, S. A. Abbas, and E. L. Evnevich. Model-Based Data Collection Systems on Fog Platforms. Congress on Intelligent Systems. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6984-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6984-9_1)
- 13- Alexander Vodyaho; Radoslav Yoshinov; Nataly Zhukova; Aung Myo Thaw; Abbas Saddam Ahmed, Fog Oriented Model for Data Collection in the Networks of Mobile Devices. DTGS 2020 (Digital Transformation & Global Society), 2020. [10.1109/IS48319.2020.9200138](https://doi.org/10.1109/IS48319.2020.9200138)
- 14- A. I. Vodyaho, N.A. Zhukova, S. A. Abbas, I.A. Kulikov, Context aware data collection systems for cyber-physical systems, 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2021), 26-28 May 2021, DOI: [10.1109/SCM52931.2021.9507163](https://doi.org/10.1109/SCM52931.2021.9507163)
- 15- Alexander Vodyaho, Nataly Zhukova, Igor Kulikov and Saddam Abbas // Using the context-sensitive policy mechanism for building data acquisition systems in large scale distributed cyber-physical systems built on fog computing platforms // журнал: Computers 2021, [10.3390/computers10080101](https://doi.org/10.3390/computers10080101)
- 16- Alexander Vodyaho, Nataly Zhukova, Yulia Schichkina, Saddam Abbas and Vladimir Chernokulsky. Towards building cyber-physical systems with agile architecture, Journal of Computer Networks and Communications. <https://doi.org/10.1155/2022/4952059>.
- 17- Alexander Vodyaho, Nataly Zhukova, Yulia Schichkina, Fahem Anaam and Saddam Abbas. About one approach to using dynamic models to build digital twins. Designs 2022. <https://doi.org/10.3390/designs6020025>.

#### **В прочих изданиях**

- 18- Водяхо А.И., Жукова Н.А., Червонцев М.А., Аббас С.А. Архитектурное проектирование подсистем мониторинга киберфизических систем // XXIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 27–29 мая 2020 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
- 19- А. И. Водяхо, А. А. Андреева, С. А. М. Аббас, М. А. Червонцев, Создание и мониторинг образовательного контента в сфере ИТ образования // XXVI международная научно-методическая конференция "современное образование: Содержание, технологии, качество" 29 сентября 2020 г. стр. 427- 431 [https://sto.etu.ru/assets/files/2020/sbornik-sto\\_2020.pdf](https://sto.etu.ru/assets/files/2020/sbornik-sto_2020.pdf)
- 20- A. I. Vodyaho, N.A. Zhukova, M. A. Chervontsev, S. A. Abbas “Architectural design of cyberphysical monitoring subsystem // 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements, [10.1109/SCM50615.2020.9198820](https://doi.org/10.1109/SCM50615.2020.9198820) 337 с. стр. 159- <https://scm.etu.ru/assets/files/2020/scm20/papers/2/159.pdf>
- 21- Аббас Саддам Ахмед, Водяхо Александр Иванович, Жукова Наталия Александровна, Червонцев Михаил Александрович. Проблемы сбора данных в кибер-физических системах // XVII Санкт-Петербургская международная конференция «региональная информатика (РИ-2020)» Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020 г. стр.298. [http://spoisu.ru/files/ri/ri2020/ri2020\\_materials\\_1.pdf](http://spoisu.ru/files/ri/ri2020/ri2020_materials_1.pdf)
- 22- Аббас Саддам Ахмед, Водяхо Александр Иванович, Жукова Наталия Александровна, Червонцев Михаил Александрович. Типовые задачи сбора данных в гетерогенных распределенных информационно-ориентированных системах и возможные варианты их решения с использованием модельного подхода//. конференция «информационные технологии в управлении» ИТУ-2020, 6–8 октября 2020, Санкт-Петербург, Россия. стр.63-66 <https://itc.etu.ru/assets/files/itc-2020/papers/063.pdf>

- 23- Saddam Abbas, Alexander Vodyaho, Vladimir Chernokulsky and Natalia Zhukova, One Approach To Construct Ambient Intelligence System's (AmIS) Models Based On Fog Platforms, Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems 2020, Международная конференция «Майоровские чтения» (MICSECS-2020) <https://2020.micsecs.org/program.html>
- 24- А. А. Андреева, А.И. Водяхо, Н.А. Жукова, С.А. Аббас, проблемы построения образовательных траекторий в сфере ИТ образования и возможные пути их решения, XXVII международная научно-методическая конференция "современное образование: Содержание, технологии, качество" 21 апреля 2021 г. Стр: 417-419 [https://sto.etu.ru/assets/files/2021/sbornik\\_sto-2021.pdf](https://sto.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_sto-2021.pdf)
- 25- А.И. Водяхо, Н.А. Жукова, С. А. Аббас, И.А. Куликов. Контекстно-ориентированные системы сбора данных, ориентированные на использование в составе киберфизических систем, XXIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, (SCM'2021). Стр 248-250. <https://scm.etu.ru/assets/files/2021/scm21/papers/248-250.pdf>
- 26- С.А. Аббас, А. А. Андреева, А.И. Водяхо, Н.А. Жукова, Построение систем управления образовательным контентом на основе графов знаний, XXVIII международная научно-методическая конференция "современное образование: Содержание, технологии, качество" 14 апреля 2022 г. Стр: 337-339 <https://sto.etu.ru/assets/files/2022/sto-2022.pdf>
- 27- Водяхо А.И., Жукова Н.А., Аббас С.А., Куликов И.А., Анаам Ф.А. Об одном подходе к синтезу моделей динамических цифровых двойников. XXV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2022). 25 - 27 мая, 2022. [https://scm.etu.ru/assets/files/2022/scm22/papers/stend05\\_162.pdf](https://scm.etu.ru/assets/files/2022/scm22/papers/stend05_162.pdf)

#### **Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

- 28- Программа для безопасного сбора данных в сетях мобильных устройств, / программа для ЭВМ, № 2021618766, дата выдачи 01.06.2021.
- 29- Программа для сбора данных в сетях мобильных устройств с ограниченными энергоресурсами, программа для ЭВМ, № 2021618931, дата выдачи 02.06.2021.