

На правах рукописи



**СОЛЯНИК Сергей Анатольевич**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ  
КОМПЛЕКСОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ  
ДАННЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и  
компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Кравец Олег Яковлевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Абрамов Геннадий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», зав. кафедрой математического обеспечения ЭВМ

**Лебеденко Евгений Викторович**, кандидат технических наук, доцент, ФГКВУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», сотрудник

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»** (г.Красноярск)

Защита состоится «14» июня 2019 года в 16<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.037.13, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу 394026, г. Воронеж, Московский просп., д. 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте [www.cchgeu.ru](http://www.cchgeu.ru).

Автореферат разослан «23» апреля 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Гусев Константин Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Взрывной рост потребностей общества в обслуживающем программном обеспечении породил множество методов его синтеза. Большой вклад в развитие методов синтеза внесли Кулямин В.В., Храмцов П.Б., Attie P.C., Clarke E.M., Emerson E.A. В теоретическом плане ряд методов синтеза относится к некоторой форме поиска в пространстве, и потому синтез параллельных программ, состоящих из  $K$  последовательных процессов, каждый из которых имеет локальное состояние  $O(N)$ , требует создания глобальной диаграммы изменения состояний размерности  $O(N^K)$ . Разумной идеей кажется создание “параметрической система”, в которой процессы могут быть разделены на небольшое количество “классов эквивалентности”, в каждом из которых все процессы изоморфны, особенно в беспроводных информационных системах.

Несмотря на негарантирующую доставку данных природу беспроводных каналов, приложения, которые нуждаются в надежных средствах передачи, переходят на беспроводные сети. Это привело к попыткам создания WSN-стандартов коммуникаций, адаптированных к промышленной автоматизации. В данной области ведущие исследователи Жожикашвили В.А., Олифер В.Г., Johansson M., Nixon M. развили множество подходов. Ключевыми показателями корректности метрик для всех этих стандартов взаимодействия являются надежность и вероятность того, что пакет будет успешно доставлен к месту назначения. Необходима метрика надежности сети для: 1) быстрой оценки и сравнения различных топологий маршрутизации, чтобы разработать стратегии размещения беспроводных узлов; 2) восприятия ее как интерфейса беспроводной сети к системам, построенным на этих сетях (например, сетевые системы управления); и 3) помощи в создании надежной топологии маршрутизации.

Функционирование распределенной системы обеспечения единства измерений как целостного образования предполагает наличие определенной структуры, объединяющей отдельные составляющие системы. Белобрагин В.Я., Емельянов С.В., Задорожный В.Н., Мальцева С.В. создали основу исследования такой структуры. Анализ основных компонентов управления территориальными системами обеспечения единства измерений традиционно основан на методе блочного моделирования, при котором объект моделирования разбивается на блоки, каждый из которых может быть проанализирован как самостоятельно, так и во взаимосвязи с другими блоками. Однако проблема оценки эффективности функционирования программных систем управления обеспечением единства измерений по-прежнему остается открытой.

Таким образом, актуальной является задача разработки математического и программного обеспечения создания комплексов распределенного управления потоками данных территориальных информационных систем.

Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

**Целью работы** является разработка математического и программного обеспечения комплексов распределенного управления потоками данных территориальных информационных систем на основе согласованных

параллельных программ с разделяемой памятью с использованием ориентированного ациклического графа и вероятности доставки данных узлами системы.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модель проектирования программных систем, обеспечивающую синтез согласованных параллельных программ с разделяемой памятью, состоящих из крупных и динамически изменяющихся последовательных процессов.

2. Доказать устойчивость алгоритма синтеза параллельных программ с разделяемой памятью на основе графа ожидания.

3. Разработать метрику для измерения качества доставки в беспроводных коммуникационных подсистемах распределенных информационных систем, обеспечивающую непрерывное измерение вероятности доставки данных.

4. Разработать алгоритм построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях, гарантирующий отсутствие петель в маршрутах.

5. Создать формализацию программной модели управления территориальной системой, позволяющую повысить эффективность управления системой обеспечения единства измерений.

6. Разработать математическое и программное обеспечение управления распределенными территориальными системами на основе иерархической оценки промежуточных показателей.

7. Разработать элементы информационного и программного обеспечения импорта и экспорта объектов территориально распределенных баз данных, обеспечивающего создание SQL-сценариев для экспорта/импорта нескольких таблиц.

**Объект исследования:** территориальные информационные системы.

**Предмет исследования:** математическое и программное обеспечение комплексов распределенного управления потоками данных территориальных информационных систем.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертации задач использовались методы математического программирования, теория принятия решений, а также методы объектно-ориентированного программирования.

**Тематика работы** соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»: п.1 «Модели, методы и алгоритмы проектирования и анализа программ и программных систем, их эквивалентных преобразований, верификации и тестирования»; п.8 «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования» и п. 10 «Оценка качества, стандартизация и сопровождение программных систем».

**Научная новизна работы.** В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Модель проектирования программных систем, отличающаяся использованием бесконечного количества универсальных наборов уникальных

индексов и обеспечивающая синтез согласованных параллельных программ с разделяемой памятью, состоящих из крупных и динамически изменяющихся последовательных процессов.

2. Доказательство устойчивости алгоритма синтеза параллельных программ с разделяемой памятью на основе графа ожидания при условии сохранения возможности последующего перемещения процесса после предшествующего перемещения.

3. Метрика для измерения качества доставки в беспроводных коммуникационных подсистемах распределенных информационных систем, отличающаяся использованием ориентированного ациклического графа и обеспечивающая непрерывное измерение вероятности доставки данных.

4. Алгоритм построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях, отличающийся учетом вероятности доставки данных узлами системы и гарантирующий отсутствие петель в маршрутах.

5. Формализация программной модели управления территориальной системой, основанная на использовании аппарата нечеткой логики, позволяющая повысить эффективность управления системой обеспечения единства измерений.

6. Структура нечетко-множественной модели оценки результативности программного управления распределенными территориальными системами на основе иерархической оценки промежуточных показателей.

7. Структура информационного и программного обеспечения импорта и экспорта объектов территориально распределенных баз данных, отличающаяся возможностью визуальной настройки и обеспечивающая создание SQL-сценариев для экспорта/импорта нескольких таблиц.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** заключается в разработке математического и программного обеспечения комплексов распределенного управления потоками данных территориальных информационных систем на основе согласованных параллельных программ с разделяемой памятью с использованием ориентированного ациклического графа, а также информационного и программного обеспечения импорта и экспорта объектов территориально распределенных баз данных, обеспечивающего создание SQL-сценариев для экспорта/импорта нескольких таблиц.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Модель программных систем, отличающаяся использованием бесконечного количества универсальных наборов уникальных индексов, обеспечивает синтез согласованных параллельных программ с разделяемой памятью.

2. Метрика для измерения качества доставки в беспроводных коммуникационных подсистемах распределенных информационных систем, отличающаяся использованием ориентированного ациклического графа, дает возможность непрерывного измерения вероятности доставки данных.

3. Алгоритм построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях, отличающийся учетом вероятности доставки данных узлами системы, гарантирует отсутствие петель в маршрутах.

4. Формализация программной модели управления территориальной

системой, основанная на использовании аппарата нечеткой логики, позволяет улучшить управление системой обеспечения единства измерений.

**Результаты внедрения.** Основные результаты внедрены в Воронежском филиале Академии стандартизации, метрологии и сертификации, в учебный процесс Воронежского государственного технического университета в рамках дисциплин: «Вычислительные машины, системы и сети», «Информационные сети и телекоммуникационные технологии», а также в рамках курсового и дипломного проектирования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: International Scientific School "Paradigma" Summer-2016 (Varna, Bulgaria, 2016); XXII-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis» (Yelm, WA, USA, 2017); XXIV-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP-2019'SCT)» (Yelm, WA, USA, 2019), а также на научных семинарах кафедры Автоматизированных и вычислительных систем (2016-2019 гг.).

Достоверность результатов обусловлена корректным использованием теоретических методов исследования и подтверждена результатами вычислительных экспериментов и внедрения.

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 19 научных работ, в том числе 9 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 1 – в издании WoS и одно свидетельство о регистрации программы). В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [2, 4, 16, 17] – модель программных систем, состоящих из крупных и динамически изменяющихся последовательных процессов; [5, 10] – метрика для измерения качества доставки в беспроводных коммуникационных подсистемах распределенных информационных систем, обеспечивающая непрерывное измерение вероятности доставки данных; [7, 19] – алгоритм построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях, гарантирующий отсутствие петель в маршрутах; [9, 15] – структура программного комплекса и реализация его отдельных компонент; [3, 13] – формализация программной модели управления территориальной системой, позволяющая повысить эффективность управления системой обеспечения единства измерений; [1] – структура нечетко-множественной модели оценки результативности программного управления распределенными территориальными системами на основе иерархической оценки промежуточных показателей; [8, 12, 14] результаты интеграции специального математического и программного обеспечения в метрологическую практику.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 165 наименований. Работа изложена на 131 странице.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации и внедрении работы.

**В первой главе** исследуются особенности разработки математического и программного обеспечения комплексов распределенного управления потоками данных территориальных информационных систем на основе согласованных параллельных программ, и анализируется современное состояние проблемы управления ими. Отмечено, что повысить эффективность управления данными системами можно путем создания параллельных программ с разделяемой памятью с использованием ориентированного ациклического графа и вероятности доставки данных узлами системы. Исходя из этого, проанализированы существующие подходы к решению данных задач. Результат данного анализа потребовал формализации данных задач, а также алгоритмизации их решения с учетом особенностей, отраженных на рис. 1.

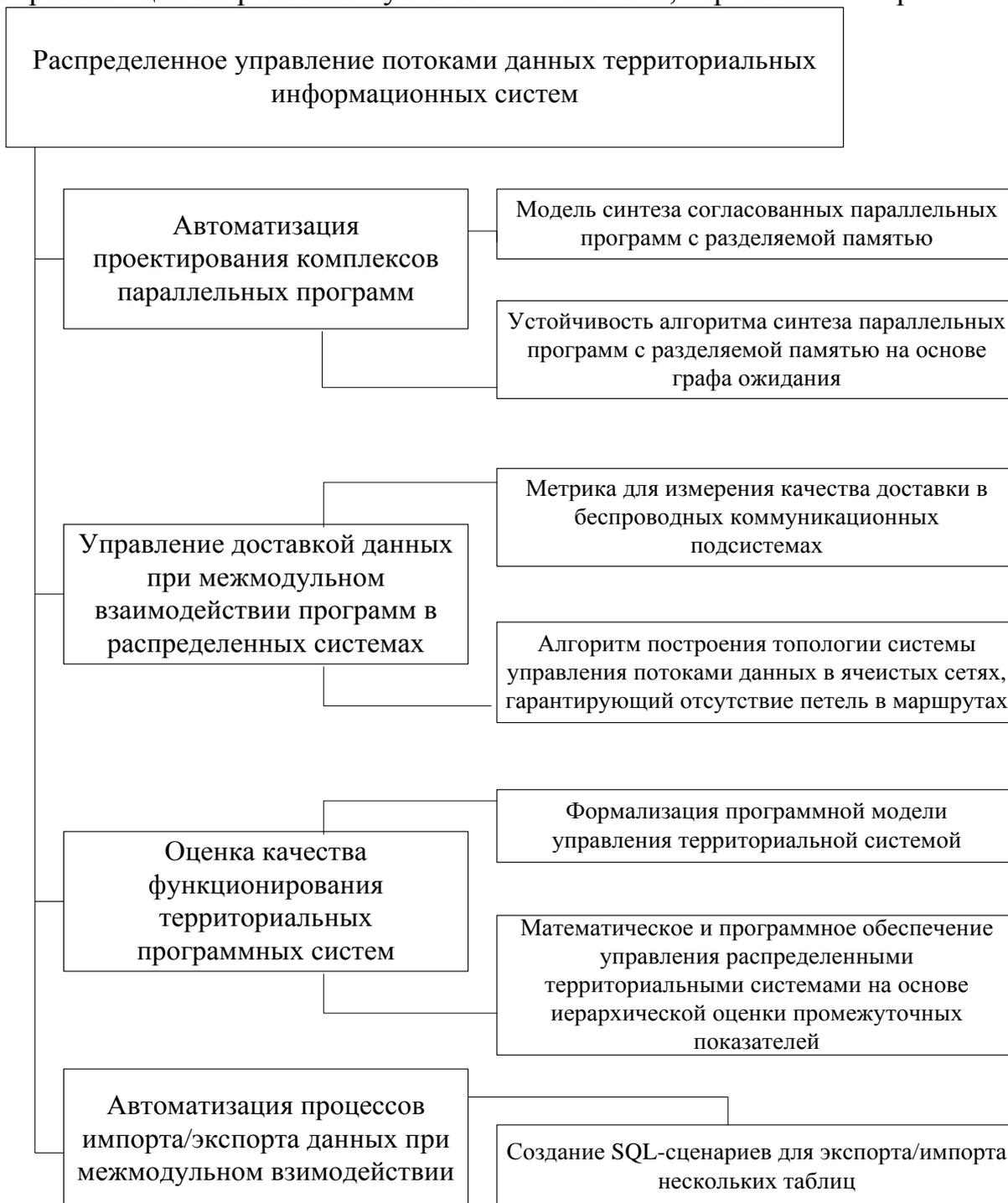


Рис. 1. Дизайн исследования

Сформулирована цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена моделированию и алгоритмизации синтеза программных систем с разделяемой памятью на основе графа ожидания.

Предполагаем, что существует бесконечное количество универсальных наборов  $Pids$  уникальных индексов процесса. Параллельная программа  $P$  состоит из конечного, неограниченного и возможно переменного числа последовательных процессов  $P_i$ ,  $i \in Pids$ , работающих параллельно, т.е.  $P = P_1 \parallel \dots \parallel P_k$ , где  $P_1, \dots, P_k$  выполняются параллельно с процессами, которые были недавно “созданы”. С каждым новым процессом  $P_i$ , связываем единственный, уникальный индекс, а именно  $i$ . Два процесса являются подобными тогда и только тогда, когда один может быть получен с помощью другого, путем изъятия индексов. Это соответствует параллельным алгоритмам, где единственная “универсальная” индексируемая часть кода дает основу для всех процессов.

Для определения синтаксиса и семантики парных программ, предложим следующую модель синхронизации. Скелет синхронизации процесса  $P_i$  - это конечная программа, где каждое состояние представляет собой код, который выполняет некоторое последовательное вычисление, а каждая дуга представляет условный переход (между различными областями последовательного кода) для определения ограничений синхронизации. Формально, скелет синхронизации каждого процесса  $P_i$  - это ориентированный граф, где каждый узел  $s_i$  - это уникальное локальное состояние процесса  $P_i$ , а каждая дуга -  $\bigoplus_{\ell \in [n]} V_\ell \rightarrow A_\ell$ , где каждый  $V_\ell \rightarrow A_\ell$  представляет собой защищенную команду, а  $\bigoplus$  является защищенной командой “дизъюнкция”

Моделируем параллелизм обычным способом, путем недетерминированного чередования “атомарного” перехода отдельных скелетов синхронизации процессов  $P_i$ .

Для того, чтобы синтезировать крупную согласованную программу  $P = P_{i1} \parallel \dots \parallel P_{ik}$  без генерации глобальной диаграммы изменения состояний, и таким образом, подвергнуть ее экспоненциальной сложности в числе составляющих процессов  $P$ . Эта цель достигается за два шага:

1. Для каждой пары процессов  $P$ , которые непосредственно взаимодействуют друг с другом, синтезируется парная программа, которая описывает их взаимодействие.

2. Объединяются все парные программы, чтобы получить процесс  $P$ .

Алгоритм выполнения первого шага следующий. Рассматривается сначала обобщение трех попарно соединённых между собой процессов  $i, j, k$ , т.е.  $I = \{(i, j), (j, k), (k, i)\}$ . Что касается процесса  $i$ , надлежащее взаимодействие (то есть, взаимодействие, которое должно удовлетворять спецификациям) между процессами  $i$  и  $j$  обеспечивается с помощью команд синхронизации путем маркировки дуг из  $P_i^j$ . Точно так же, надлежащее взаимодействие между процессами  $i$  и  $k$ , маркирует дуги  $P_i^k$ .

**Определение 1.** I-процесс  $P_i$  получен из парных процессов  $P_i^j$  для всех

$j \in I(i)$  следующим образом:  $P_i$  содержит перемещение от  $s_i$  до  $t_i$  с маркировкой  $\otimes_{j \in I(i)} \oplus_{\ell \in [1:n]} B_{i,\ell}^j \rightarrow A_{i,\ell}^j$ , если для каждого  $j$  из  $I(i)$ :  $P_i^j$  содержит перемещение от  $s_i$  до  $t_i$  с маркировкой  $\oplus_{\ell \in [1:n]} B_{i,\ell}^j \rightarrow A_{i,\ell}^j$ .

Начальный набор состояний  $S_I^0$  I-программы получается из начального состояния  $S_{ij}^0$  парной программы следующим образом:

$$S_I^0 = \{s \mid \forall (i, j) \in I: (s \mid ij \in S_{ij}^0)\}.$$

Здесь  $\oplus$  и  $\otimes$  - команды “дизъюнкция” и “конъюнкция”.

**Определение 2.** Пусть  $i I j$ . Семантика  $(S_{ij}^0, P_i^j \parallel P_j^i)$ , данная парной структурой  $M_{ij} = (S_{ij}^0, S_{ij}, R_{ij})$ , где

1.  $S_{ij}$  - это набор  $ij$ -состояний,
2.  $S_{ij}^0 \subseteq S_{ij}$  дает начальные состояния  $(S_{ij}^0, P_i^j \parallel P_j^i)$ , и
3.  $R_{ij} \subseteq S_{ij} \times \{i, j\} \times S_{ij}$  являются отношением перехода к  $(S_{ij}^0, P_i^j \parallel P_j^i)$ .

Переход  $(s_{ij}, h, t_{ij})$  от  $P_h^{\bar{h}}$  находится в  $R_{ij}$ , тогда и только тогда, когда:

- (a)  $h \in \{i, j\}$ ,
- (b)  $s_{ij}$  и  $t_{ij}$  - это  $ij$ -состояния, и
- (c) существует перемещение  $(s_{ij} \mid h, \oplus_{\ell \in [1:n]} B_{h,\ell}^h \rightarrow A_{h,\ell}^h, t_{ij} \mid h)$  в  $P_h^{\bar{h}}$ , такое

что существует  $m \in [1:n]$ :

- (i)  $s_{ij}(B_{h,m}^{\bar{h}}) = \text{true}$ ,
- (ii)  $\langle s_{ij} \mid SH_{ij} \rangle A_{h,m}^{\bar{h}} \langle t_{ij} \mid SH_{ij} \rangle$ , и
- (iii)  $s_{ij} \mid \bar{h} = t_{ij} \mid \bar{h}$ .

Здесь  $\bar{h} = i$ , если  $h = j$  и  $\bar{h} = j$ , если  $h = i$ . В переходе  $(s_{ij}, h, t_{ij})$   $s_{ij}$  - начальное состояние, а  $t_{ij}$  - конечное состояние. Переход  $(s_{ij}, h, t_{ij})$  называется  $P_h^{\bar{h}}$  - переходом.

Таким образом, разработана модель проектирования программных систем, обеспечивающая синтез согласованных параллельных программ с разделяемой памятью, состоящих из крупных и динамически изменяющихся последовательных процессов.

Далее исследуется устойчивость алгоритма синтеза параллельных программ с разделяемой памятью на основе графа ожидания.

**Определение 3.**  $W_I(s)$  Пусть  $s$  будет случайным I-состоянием. Граф ожидания  $W_I(s)$  - это направленный двусторонний граф, где

1. узлы  $W_I(s)$ :
  - (a) I-процессы  $\{P_i \mid i \in \text{dom}(I)\}$ ,
  - (b) перемещения  $\{a_i^I \mid i \in \text{dom}(I) \text{ и } a_i^I \in P_i \text{ и } s \mid i = a_i^I.\text{start}\}$ ;
2. существует ребро от  $P_i$  к каждому узлу  $a_i^I$  в  $W_I(s)$ , и
3. существует ребро от  $a_i^I$  к  $P_j$  в  $W_I(s)$ , тогда и только тогда, когда  $i I j$

и  $a_i^1 \in W_1(s)$  и  $s \mid ij(a_i^1.\text{guard}_j) = \text{false}$ .

**Определение 4.** SC- это суперцикл в  $W_1(s)$  тогда и только тогда, когда выполняются все следующие условия:

1. SC не пустой,
2. если  $P_i \in \text{SC}$ , то для всех  $a_i^1$ , таких что  $a_i^1 \in W_1(s)$ :  $P_i \rightarrow a_i^1 \in \text{SC}$ ,
3. если  $a_i^1 \in \text{SC}$ , то существует  $P_j$  такое что  $a_i^1 \rightarrow P_j \in W_1(s)$  и  $a_i^1 \rightarrow P_j \in \text{SC}$ .

Условие для графа ожидания реализует требование, что после того как процесс выполняет перемещение, он должен сохранить возможность другого перемещения или не должен блокировать другой процесс.

**Определение 5.** Пусть  $t_k$  - это случайное достижимое локальное состояние  $P_k^\ell$  в  $M_{k\ell}$  для всех  $\ell \in I(k)$ , и пусть  $n = |t_k.\text{moves}|$ . Также пусть  $J$  - случайное отношение взаимодействия, такое, как  $J \subseteq I$  и  $J$  имеет форму  $\{(j, k, \text{spec}_{jk}), (k, \ell_1, \text{spec}_{k\ell_1}), \dots, (k, \ell_n, \text{spec}_{k\ell_n})\}$ , где  $k \notin \{j, \ell_1, \dots, \ell_n\}$ . Тогда для каждого достижимого  $J$ -состояния  $t_j$  в  $M_J$ , такого, что  $t_j \mid k = t_k$  и  $s_j \xrightarrow{k} t_j \in R_J$  для каждого достижимого  $J$ -состояния  $s_j$ , имеем

$$\forall a_i^J : (a_i^J \rightarrow P_k \notin W_J(t_j))$$

или  $\exists a_k^J \in W_J(t_j) : (\forall \ell \in \{\ell_1, \dots, \ell_n\} : a_k^J \rightarrow P_\ell \notin W_J(t_j))$ .

Сформулированы и доказаны утверждения и выводы, являющиеся основой доказательства устойчивости алгоритма синтеза параллельных программ.

**Утверждение 1.** Если выполняется условие для графа ожидания, и  $W_1(s_1^0)$  - свободно от суперцикла для каждого начального состояния  $s_1^0 \in S_1^0$ , тогда для каждого достижимого состояния  $t$  из  $M_1$ ,  $W_1(t)$  тоже свободно от суперцикла.

**Вывод 1.** Если  $W_1(s)$  свободно от суперцикла, то некоторое перемещение  $a_k^1$  не имеет ни одного исходящего ребра в  $W_1(s)$ .

**Вывод 2.** Пусть  $s$  - случайное  $I$ -состояние, такое что  $s \mid i = a_i^1.\text{start}$ . Если  $a_i^1$  не имеет ни одного исходящего ребра в  $W_1(s)$ , тогда  $a_i^1$  может быть выполнено в состоянии  $s$ .

**Утверждение 2.** Если для каждого достижимого состояния  $s$  из  $M_1$ ,  $W_1(s)$  - свободно от суперцикла, то  $M_1, S_1^0 \models \text{AGEXtrue}$ .

**Определение 6.** Для каждого достижимого состояния  $s_{ij}$  в  $M_{ij}$ ,  $M_{ij}, s_{ij} \models A(\text{Gex}_i \Rightarrow \overset{\infty}{G} \text{aen}_j)$ , где  $\text{aen}_j \stackrel{\text{df}}{=} \forall a_j^i \in P_j^i : (\{a_j^i.\text{start}\} \Rightarrow a_j^i.\text{guard})$ .

$\text{aen}_j$  значит, что каждое перемещение  $P_j^i$ , чье стартовое состояние является компонентом текущего глобального состояния, также возможно в текущем глобальном состоянии. Жизнеспособность условия требует в каждой парной программе  $(S_{ij}^0, P_i^j \parallel P_j^i)$ , если  $P_i^j$  может выполняться вдоль некоторого

пути, то должен существовать суффикс пути, вдоль которого  $P_i^j$  он не может блокировать перемещение  $P_j^i$ .

**Утверждение 3.** Если

1. жизнеспособность условия выдерживается,
  2. для каждого достижимого I-состояния  $u$ ,  $W_1(u)$ - свободно от суперцикла,
  3.  $M_{ij}, s \mid ij \models \neg h_{ij} \wedge AFh_{ij}$  для некоторых  $h_{ij} \in CL(\text{spec}_{ij})$ ,
- тогда  $M_{I, s} \models_{\Phi} AF(ex_i \vee ex_j)$

На основании полученных доказательств разработана большая модель для статических систем.

**Утверждение 4.** Пусть  $(i, j, \text{spec}_{ij}) \in I$ , где  $\text{spec}_{ij} \in ACTL_{ij}^-$ , а также пусть  $s$  будет случайным достижимым I-состоянием. Если

1. выполняется условие жизнеспособности для статической программы;
  2.  $W_1(u)$ - свободно от суперцикла для каждого достижимого I-состояния  $u$ ,
  3.  $M_{ij}, s \mid ij \models f_{ij}$  для некоторых  $f_{ij} \in CL(\text{spec}_{ij})$ ,
- тогда  $M_{I, s} \models_{\Phi} f_{ij}$ .

**Следствие 1.** Если условие жизнеспособности для статических программ выполняется, и  $W_1(u)$ - свободно от суперцикла для каждого достижимого I-состояния  $u$ , тогда

$$(\forall (i, j) \in I : M_{ij}, S_{ij}^0 \models \text{spec}_{ij}) \text{ implies } M_I, S^0 \models_{\Phi} \bigwedge_{(i,j) \in I} \text{spec}_{ij}.$$

Таким образом, получено доказательство устойчивости алгоритма синтеза параллельных программ с разделяемой памятью на основе графа ожидания при условии сохранения возможности последующего перемещения процесса после предшествующего перемещения.

**Третья глава** посвящена описанию моделей, метрик и алгоритмов управления вероятностными потоками в беспроводных ячеистых сетях на основе ориентированного ациклического графа.

Для измерения качества доставки предложены следующие метрики. FPP метрика предполагает, что некоторые копии пакета являются заполненными по топологии маршрутизации. Пусть  $G = (V, \mathcal{E}, \rho)$  - это взвешенный DODAG, где каждое звено  $(i, j)$  в графе имеет вероятность успешной доставки пакета -  $\rho_{ij}$ , а все ссылки или независимо успешны, или терпят неудачу. FPP метрика  $p_{a \rightarrow b} \in [0,1]$  для пары источник-адресат  $(a, b)$  - это вероятность того, что пакет, отправленный из узла  $a$ , над топологией маршрутизации  $G$  достигнет узла  $b$ , в соответствии с моделью FPP пересылки пакетов. Формула для расчета метрики FPP будет следующей:

$$p_{a \rightarrow b} = \sum_{\mathcal{E}' \in 2_{a \rightarrow b}^{\mathcal{E}}} \left( \prod_{l \in \mathcal{E}'} p_l \prod_{i \in \mathcal{E}' \setminus \mathcal{E}'} (1 - p_i) \right), \quad (3.1)$$

где  $2_{a \rightarrow b}^{\mathcal{E}}$  - это набор всех подмножеств  $\mathcal{E}$ , который содержит путь от  $a$  до  $b$ . Формула в вычислительном плане является трудоемкой, поскольку она

требует  $O(E2^E)$  вычислений.

Алгоритм преобразования DAG представляет собой сеть редуцированных вершин (RV), где каждая вершина, редуцированная на этапе  $k, C^{(k)}$ , представлена набором узлов  $S^{(k)} = 2^{C^{(k)}}$ . Каждый узел в  $S^{(k)}$  представляет собой событие, которое определено подмножеством редуцированных вершин, полученным благодаря копии пакета. Алгоритм вычисляет вероятность для каждого узла в  $S^{(k)}$ , и набор всех вероятностей узлов в  $S^{(k)}$ , представляющих совместное распределение вероятностей так, чтобы узлы в редукции вершин  $C^{(k)}$  могли получать копии пакетов..

Основным недостатком метрики FPP является то, что она не может быть вычислена в сети с помощью одного цикла местной связи. В связи с этим, предложена модель URF переадресации пакетов, узел, который получает пакет, будет выбирать наугад ссылку для передачи из всех своих исходящих ссылок. Если передача не удалась, узел выберет случайным образом другую ссылку для передачи, которая ранее не была выбрана.

Пусть  $G = (V, \mathcal{E}, p)$  - это взвешенный DODAG, где каждое звено  $(i, j)$  в графе имеет вероятность  $p_{ij}$  успешной поставки пакета и всех ссылок независимо от того, успех это или неудача. URF метрика  $Q_{a \rightarrow b} \in [0,1]$  для пары источник-адресат  $(a, b)$  - это вероятность того, что пакет, отправленный из узла  $a$  топологии маршрутизации  $G$ , достигнет узла  $b$  в соответствии с URF моделью переадресации пакетов.

URF метрику  $Q_{a \rightarrow b}$  можно вычислить с помощью

$$Q_{a \rightarrow a} = 1 \quad (3.2)$$

$$Q_{a \rightarrow v} = \sum_{u \in U_v} Q_{a \rightarrow u} \bar{w}_{uv}, \quad (3.3)$$

где  $U_v$  - все верхние соседи узла  $v$  и  $\bar{w}_{uv} \in [0,1]$  - вес одноадресной ретрансляции потока (URF вес) ссылки  $(u, v)$ . URF-вес для связи  $l = (u, v)$  является вероятностью того, что пакет в  $u$  будет проходить ссылку на  $v$ , и определяется

$$\bar{w}_{uv} = \sum_{\mathcal{E}' \in 2^{\mathcal{E}_{u|}}} \frac{p_{uv}}{|\mathcal{E}'| + 1} \left( \prod_{e \in \mathcal{E}'} p_e \right) \left( \prod_{\bar{e} \in \mathcal{E}_u \setminus (\mathcal{E}' \cup l)} 1 - p_{\bar{e}} \right) \quad (3.4)$$

где  $\mathcal{E}_u = \{(u, v) \in \mathcal{E} : v \in V\}$  - это множество узлов  $u$  исходящих ссылок.

Самым медленным шагом в вычислении метрики URF является расчет (3.4) со сложностью  $O(\Delta^+ \cdot 2^{\Delta^+})$ . Если упростить (3.4) как

$$\bar{w}_{uv} = p_{uv} \int_0^1 \prod_{e \in \mathcal{E}_u \setminus (u, v)} (1 - p_e x) dx, \quad (3.5)$$

то вычислительная сложность может быть оценена как  $O((\Delta^+)^2)$ .

URF модель переадресации может быть реализована и как в виде CSMA-, и как TDMA-сети.

Для построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях разработан алгоритм URF-Delayed\_Thresholds (URF-DT). Его схема приведена на рис. 2. В каждой окружности  $k$  узел  $u$  решает, должен

ли он присоединиться к топологии маршрутизации с числом переходов  $\hat{h}_u$  или нет. Если узел  $u$  присоединиться к числу переходов  $\hat{h}_u$ , тогда нижние соседи  $u$ , являются соседями  $v_i$  со счетом меньше, чем  $\hat{h}_u$ , которое максимизирует  $Q_{u \rightarrow b}$  из (3.5). Узел  $u$  решает, стоит ли ему присоединиться к топологии, и с каким счетом  $\hat{h}_u$ , нужно вычислять максимальную надежность  $Q_{u \rightarrow b}^*$  для каждого перехода  $h \in \{\min_{v \in V_u} \hat{h}_v + 1, \dots, \max_{v \in V_u} \hat{h}_v + 1\}$  с порогом  $\tau_m$ , который зависит от  $h$ .

**Input:** граф подключения  $\bar{G} = (\bar{V}, \bar{\mathcal{E}}, \rho)$ ,  $b$ ,  $\tau$ ,  $K$

**Output:** топология маршрутизации  $G = (V, \mathcal{E}, \rho)$ ,  $\hat{h}$

$V := \emptyset, \mathcal{E} := \emptyset$

$\forall i, \hat{h} := \text{NIL} \quad \triangleright \text{NIL} - \text{еще не назначен.}$

$\hat{h}_b := 0$

**for**  $k := 1$  **to**  $K$  **do**

[Запустим этот код одновременно на  
всех узлах  $u \notin V$  ]

Пусть  $\hat{h}_{v_u}^{\min} = \min_{v \in V_u} \hat{h}_v$ ,  $\hat{h}_{v_u}^{\max} = \max_{v \in V_u} \hat{h}_v$

**for**  $h := \hat{h}_{v_u}^{\min} + 1$  **to**  $\hat{h}_{v_u}^{\max} + 1$  **do**

$V_u^{<h}$  - соседи  $u$  с количеством переходов  
меньше, чем  $h$ .

Выберем  $v_u^* \subseteq V_u^{<h}$ , чтобы

максимизировать  $Q_{u \rightarrow b}$  из (3.4), (3.5).

Пусть  $Q_{u \rightarrow b}^*$  будет максимумом  $Q_{u \rightarrow b}$ .

**if**  $Q_{u \rightarrow b}^* \geq \tau_{k-h+1}$  **then**

$\hat{h}_u := h$

Добавим  $u$  к  $V$ . Добавим ссылки

$\{(u, v) : v \in V_u^*\}$  к  $\mathcal{E}$ .

Прервем с **for** до  $h$ .

**end if**

**end for**

**end for**

**Return:**  $G, \hat{h}$

Рис. 2. Алгоритм URF-DT

Порог  $\tau_m$ , выбранный из предопределенного вектора порогов  $\tau = [\tau_1 \dots \tau_M] \in [0, 1]^M$  используя индекс  $m = k - h + 1$ , как показано на рис. 3. При наличии нескольких  $h$  с  $Q_{u \rightarrow b}^* \geq \tau_m$ , узел  $u$  устанавливает счетчик переходов  $\hat{h}_u$  до самого маленького значения  $h$ . Если ни один из  $h$  не имеет  $Q_{u \rightarrow b}^* \geq \tau_m$ , тогда узел  $u$  не присоединяет сеть в области  $k$ .

URF-DT может сконструировать лучшую топологию маршрутизации, если  $\tau$  имеет множество порогов, которые уменьшают  $m$ , но алгоритму потребуется большее количество областей для построения топологии.

Таким образом, предложена метрика для измерения качества доставки в беспроводных коммуникационных подсистемах распределенных информационных систем, отличающаяся использованием ориентированного ациклического графа и обеспечивающая непрерывное измерение вероятности доставки данных. Кроме того, разработан алгоритм построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях, отличающийся учетом вероятности доставки данных узлами системы и гарантирующий отсутствие петель в маршрутах.

В главе 4 предложена формализация программной модели управления территориальной системой с использованием нечетких множеств.

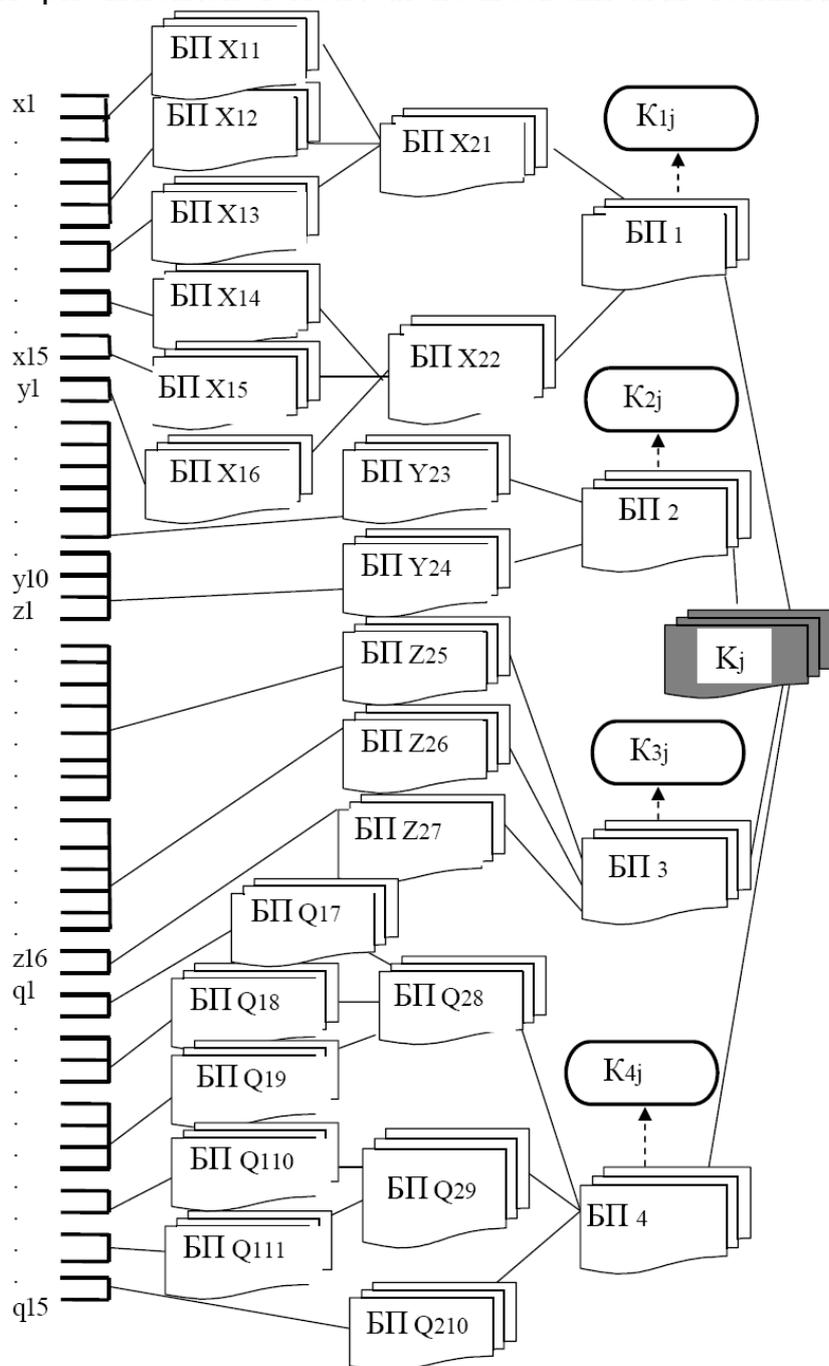


Рис. 3. Структура иерархической модели нечеткого вывода оценки результативности функционирования  $j$ -го структурного объекта, входящего в территориальную систему обеспечения единства измерений

На рис. 3 представлена структура иерархической модели нечеткого вывода оценки результативности функционирования  $j$ -го структурного объекта входящего в территориальную систему обеспечения единства измерений, где  $K_j$  - показатель оценки результативности деятельности  $j$ -го структурного объекта;  $K_{1,j} \dots K_{4,j}$  - показатели, характеризующие деятельность целевых подсистем (основные аспекты деятельности  $j$ -го структурного объекта); БП - продукционные базы правил. В качестве среды моделирования выбрана система FuzzyTech.

Границы функций принадлежности, а также веса правил по продукционным базам знаний могут уточняться по результатам статистической обработки данных, по оценке результативности функционирования рассматриваемого структурного объекта входящего в территориальную систему обеспечения единства измерений за определенный период времени.

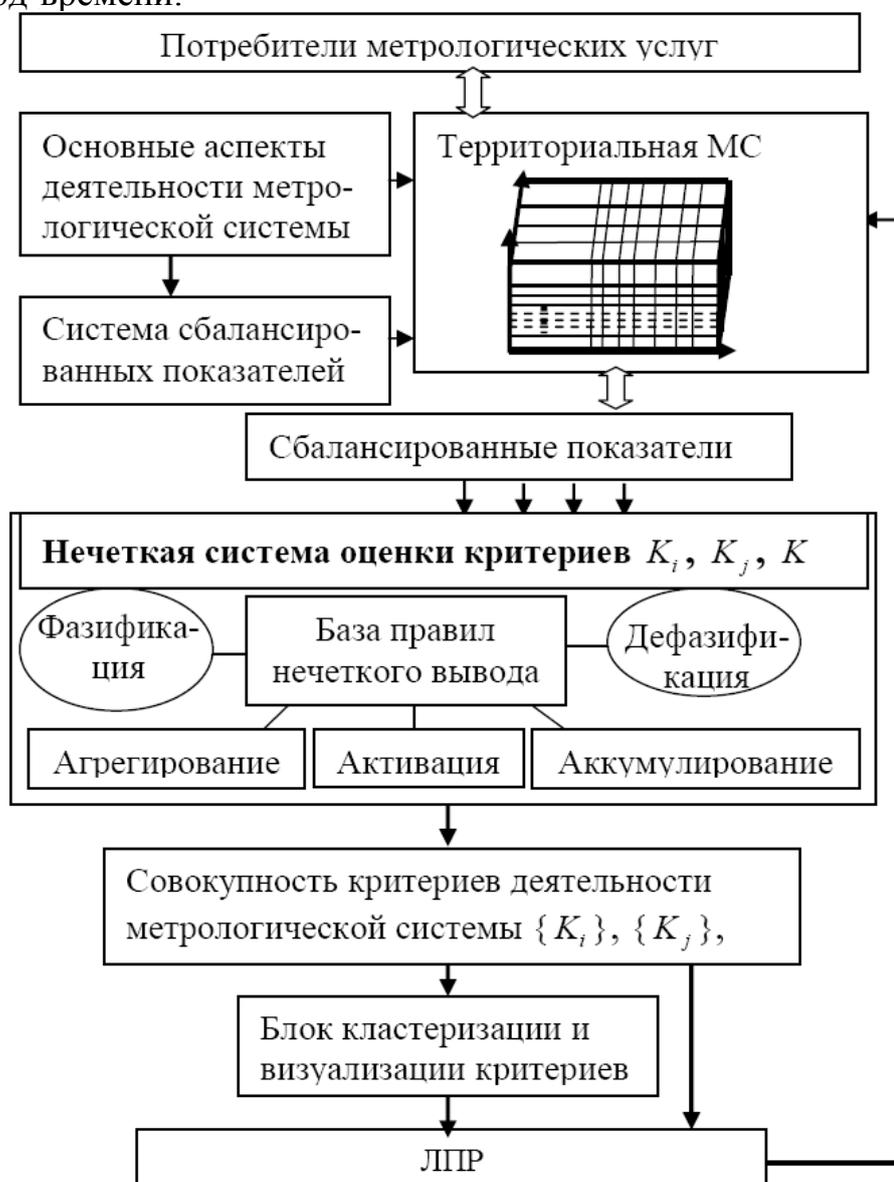


Рис. 4. Структурная схема программной системы для управления метрологической деятельностью проводимой в рамках территориальной системы обеспечения единства измерений

Структура программной системы управления метрологической деятельностью территориальной системы обеспечения единства измерений приведена на рис. 4.

В системе предусмотрена оценка промежуточных показателей результативности по процессам и группам процессов, что в свою очередь повышает гибкость ее настройки и адекватность оценки, а также дает возможность владельцам данных процессов оценить их результативность по конечным результатам и своевременно принимать правильное управленческое решение в области обеспечения управления качеством метрологической деятельности.

Таким образом, проведена формализация программной модели управления территориальной системой, основанная на использовании аппарата нечеткой логики, позволяющая повысить эффективность управления системой обеспечения единства измерений. Предложена структура нечетко-множественной модели оценки результативности программного управления распределенными территориальными системами на основе иерархической оценки промежуточных показателей.

**Глава 5** представляет информационное и программное обеспечение импорта и экспорта объектов территориально распределенных баз данных.

Разработка осуществлена на языке Delphi. В качестве библиотеки базовых классов выбрана стандартная библиотека, поставляемая с Borland Delphi VCL. Сторонние библиотеки и компоненты в программе не использованы. Программа состоит из 31 основных форм. Укрупненная структура модулей программы приведена на рис. 5.

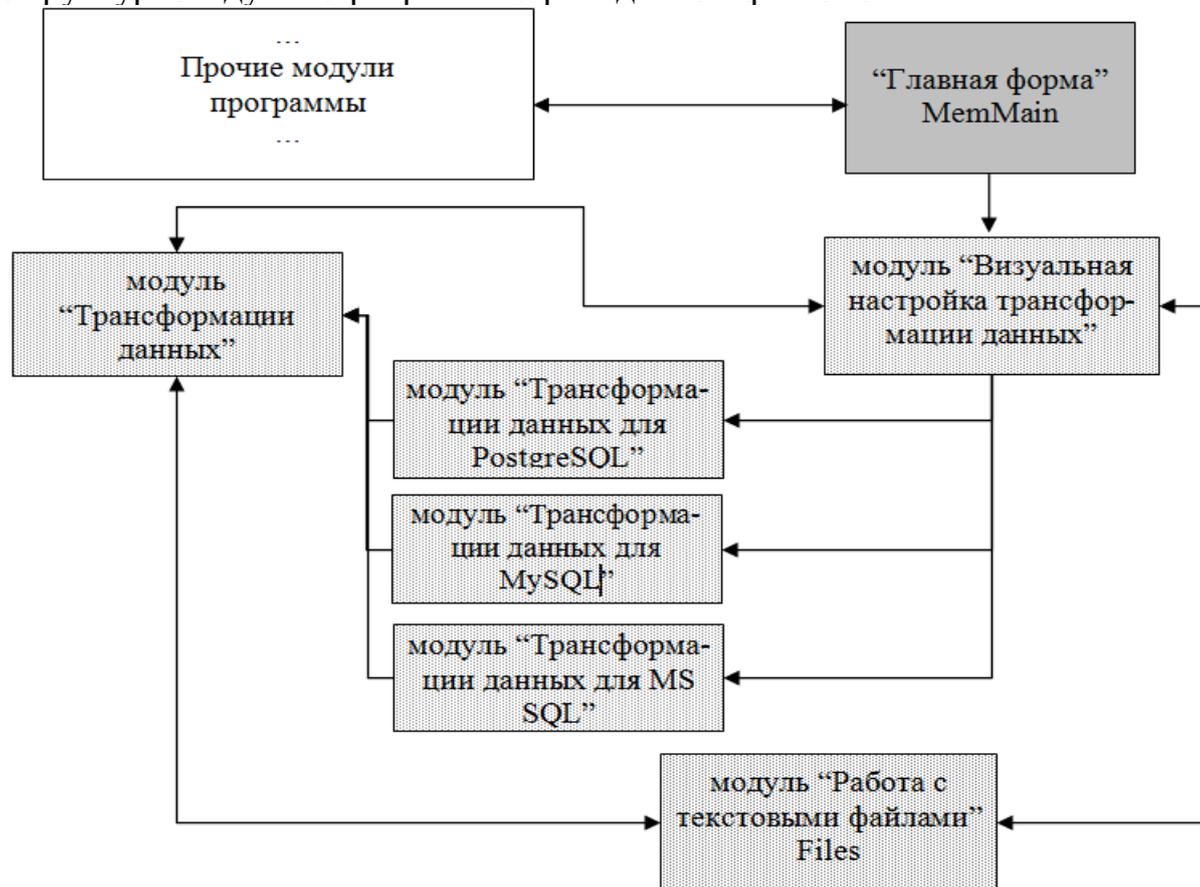


Рис. 5. Укрупненная модульная структура программы

Реализованы структуры для хранения описания отношения (рис. 6). Во всех структурах используется поле Next для построения списков соответствующих структур. Стрелками на рисунке обозначены указатели на соответствующие типы данных.

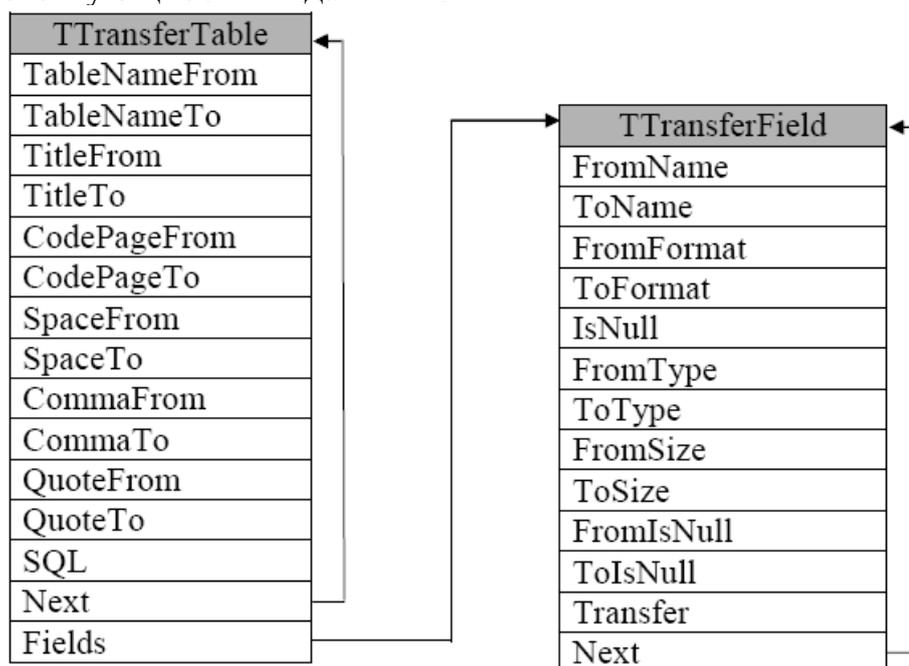


Рис. 6. Структуры для хранения описания трансформируемых таблиц

Для хранения структур в памяти используются указатель GPTT – указатель на список структур TTTransferTable. В данном списке хранятся отобранные для переноса таблицы из источника данных и их свойства. Для каждой отобранной таблицы хранится информация о том, в какие таблицы получателя информации данная таблица будет передавать свои данные, а также дополнительные свойства для таблицы-получателя данных.

Все действия, которые выполняет программа, реализуются путем выбора соответствующего узла или объекта и нажатия на нем правой кнопки мыши. При этом программа отображает соответствующее контекстное меню, в котором содержатся команды, применимые к выбранному объекту.

При выборе в качестве источника данных типа «БД» и нажатии кнопки «Далее» открывается окно диалога, изображенное на рис. 7. В нем можно указать какие именно таблицы выбранной базы данных требуется переносить. Таблицы, доступные в базе отражаются в левом списке. Таблицы, отобранные для переноса, отражаются в правом списке.

В окне процесса трансформации данных выводится информация о переносимых таблицах. В случае указания опции «Выводить подробный лог переноса» в окне отображается подробное состояние хода переноса и ошибок, возникающих в процессе трансформации данных. При окончании процесса переноса данных выводится итоговая информация о количестве успешно перенесенных таблиц и количестве таблиц, перенесенных с ошибками.

Таким образом, создана структура информационного и программного обеспечения импорта и экспорта объектов территориально распределенных баз данных, отличающаяся возможностью визуальной настройки и

обеспечивающая создание SQL-сценариев для экспорта/импорта нескольких таблиц.

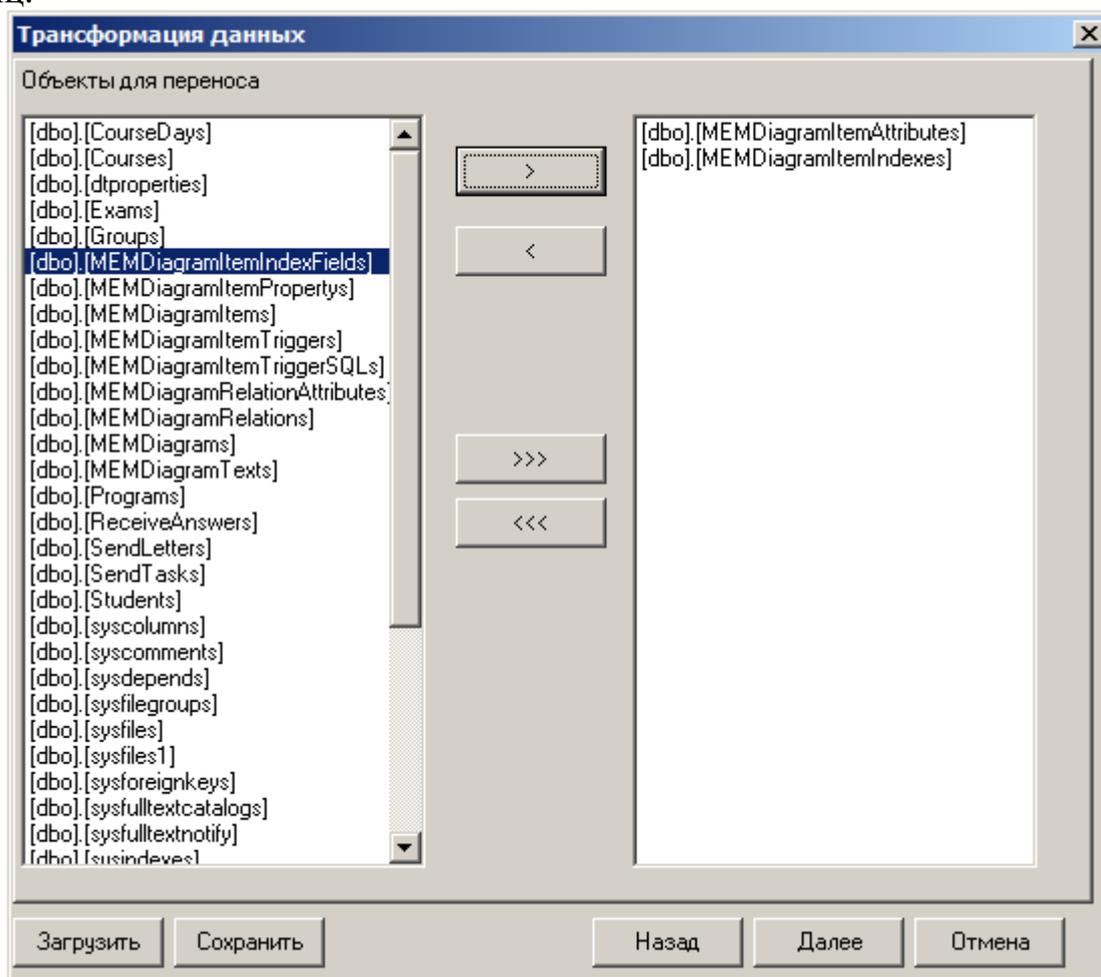


Рис. 7. Отбор таблиц для импорта

Элементы программного обеспечения зарегистрированы в ФИПС. Основные результаты внедрены в Воронежском филиале Академии стандартизации, метрологии и сертификации, в учебный процесс Воронежского государственного технического университета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлась разработка математического и программного обеспечения комплексов распределенного управления потоками данных территориальных информационных систем на основе согласованных параллельных программ с разделяемой памятью с использованием ориентированного ациклического графа и вероятности доставки данных узлами системы.

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Создана модель программных систем, обеспечивающая синтез согласованных параллельных программ с разделяемой памятью, состоящих из крупных и динамически изменяющихся последовательных процессов.

2. Получено доказательство устойчивости алгоритма синтеза параллельных программ на основе графа ожидания при условии сохранения

возможности последующего перемещения процесса после предшествующего перемещения.

3. Предложена метрика для измерения качества доставки в беспроводных коммуникационных подсистемах распределенных информационных систем, обеспечивающая непрерывное измерение вероятности доставки данных.

4. Разработан алгоритм построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях, гарантирующий отсутствие петель в маршрутах.

5. Проведена формализация программной модели управления территориальной системой, позволяющая повысить эффективность управления системой обеспечения единства измерений.

6. Разработана структура нечетко-множественной модели оценки результативности программного управления распределенными территориальными системами на основе иерархической оценки промежуточных показателей.

7. Создана структура информационного и программного обеспечения импорта и экспорта объектов территориально распределенных баз данных, и обеспечивающая создание SQL-сценариев для экспорта/импорта нескольких таблиц.

8. Элементы программного обеспечения зарегистрированы в ФИПС.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Публикации в изданиях списка ВАК**

1. Соляник А.И., Соляник С.А. Формализация программной модели управления территориальной системой с использованием нечетких множеств// Системы управления и информационные технологии, №3(65), 2016. – С. 87-92.

2. Соляник С.А., Соляник А.И. Рационализация плановой диагностики дискретно-событийных систем в «холодном» режиме// Системы управления и информационные технологии, №4.1(66), 2016. – С. 184-188.

3. Соляник С.А., Кравец О.Я. Разработка процессной модели создания прикладных IT-решений для задач управления// Экономика и менеджмент систем управления, №3(25), 2017. – С. 79-86.

4. Соляник С.А., Кравец О.Я. Исследование устойчивости процесса синтеза статических программных систем с блокировками// Экономика и менеджмент систем управления, №3.1(25), 2017. – С. 166-179.

5. Кравец О.Я., Соляник С.А. Управление вероятностными потоками в беспроводных ячеистых сетях на основе использования ориентированного ациклического графа// Системы управления и информационные технологии, №4(70), 2017. – С. 40-44.

6. Соляник С.А. Управление потоками данных в беспроводных ячеистых сетях с однократной рассылкой по топологии графа// Системы управления и информационные технологии, №1(71), 2018. – С. 85-88.

7. Кравец О.Я., Соляник С.А. Алгоритмизация построения топологии системы управления потоками данных в ячеистых сетях// Системы управления и информационные технологии, №3(73), 2018. С.66-69.

8. Tatarintsev V., Solyanik S.A., Kravets O.Ya., Khrapylina L. Improvement of methodology of end-to-end integrated management of quality of metrological activities in geographically distributed systems of ensuring the uniformity of measurements// Quality - Access to Success, August 2017. Vol. 18 - No. 159. p. 84-89. ISSN 1582-2559. <http://www.srac.ro/calitatea/en/arhiva/2017/2017-04-Contents.pdf> (**Web of Science**)

## **Свидетельство о государственной регистрации программ**

9. Кравец О.Я., Барабанова И.А., Соляник С.А. Программа нечёткого к-поиска близких объектов. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018666616 от 19.12.2018. М.: ФИПС, 2018.

### **Статьи и материалы конференций**

10. Соляник С.А., Кравец О.Я. Модели и алгоритмы оперативного управления вероятностными процессами в многоуровневой специализированной системе// Информационные технологии моделирования и управления, №4(100), 2016. – С. 70-80.

11. Соляник С.А. Способ определения диагностических способностей системы с полиномиальной оценкой трудоемкости по времени// Информационные технологии моделирования и управления, №6(102), 2016. – С. 437-445.

12. Кравец О.Я., Соляник С.А. Результат от интегрирането на специален математически и софтуер в практиката на метрологията// Парадигма. Електронно научно списание. Брой 2/2016. - С. 59-74. [http://niiparadigma.ru/?page\\_id=1783](http://niiparadigma.ru/?page_id=1783).

13. Соляник С.А., Кравец О.Я. Размита моделиращи дейности лаборатории за калибриране като структурна предмет на териториално система, гарантираща единство на измеренията // Парадигма. Електронно научно списание. Брой 2/2016. - С. 145-158. [http://niiparadigma.ru/?page\\_id=1783](http://niiparadigma.ru/?page_id=1783).

14. Solyanik S.A., Kravets O.Ja. The results of the special mathematical and software integration in metrological practice// Selected Papers of the International Scientific School "Paradigma" Summer-2016 (Varna, Bulgaria). - Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2016. – p. 101-115.

15. Кравец О.Я., Соляник С.А. Разработка процессной модели управления инновационной деятельностью при разработке наукоемких прикладных IT-решений в условиях импортозамещения в сфере информационных технологий// Информационные технологии моделирования и управления, №2(104), 2017. – С. 115-132.

16. Соляник С.А., Кравец О.Я. Элементы синтеза статических программных систем с компонентами параллелизма// Информационные технологии моделирования и управления, №4(106), 2017. – С. 274-284.

17. Solyanik S.A., Kravets O.Ja. The approach to the creation of software systems synthesis technology with overlapping elements and model of shared memory// Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis: Proceedings of the XXII-th International Open Science Conference. - Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2017. - P. 278-286.

18. Соляник С.А. Графовые инструменты управления пакетами без предварительного оповещения// Информационные технологии моделирования и управления, №3(111), 2018. – С. 234-239.

19. Solyanik S.A., Kravets O.Ja. Data export based on k-best decision making// Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP-2019'SCT): Proceedings of the XXIV-th International Open Science Conference. - Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2019. – P. 225-230.

---

Подписано в печать 12.04.2019.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14