

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кубанский государственный университет»

на правах рукописи

СИНЕЛЬНИКОВА ТАТЬЯНА ИБРАГИМОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА УРОВНЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук,
доцент Исаев Владислав Андреевич

Краснодар – 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Анализ методов принятия решений относительно неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой	18
1.1 Особенности математического моделирования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой	19
1.2 Системологическая методология исследования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой и принятия решений.....	37
1.3 Выводы.....	65
Глава 2. Исследование и разработка математического обеспечения инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем	70
2.1 Построение математических моделей эпистемологических уровней порождающих и структурированных систем.....	70
2.2 Исследование возможности применения системологических методов в инструментальных средствах для поддержки принятия решений относительно неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой.....	76
2.3 Разработка численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них.....	80
2.4 Разработка модифицированного численного метода структурированных систем	85
2.5 Проектирование инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем	90
2.5.1 Проектирование модуля поиска глубинных связей между элементами системы	93

2.5.2 Проектирование модуля построения полной системы	97
2.5.3 Аналитическое описание модуля поиска оптимальных порождающих систем.....	99
Глава 3. Экспериментальное исследование инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем	104
3.1 Исследование программной реализации инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем и их особенности.....	105
3.2 Апробирование инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем	116
Заключение	146
Библиографический список.....	150
Приложение А. Копии документов, подтверждающих использование результатов диссертационной работы	170
Приложение Б. Фрагмент программной реализации. Программная функция базовой процедуры соединения.....	174
Приложение В. Копии свидетельств о государственной регистрации программ	179

Введение

Актуальность темы. Математическое моделирование с позиции системного подхода позволяет объекты, явления и процессы описать в виде систем в совокупности единства частей, организованной структуры, внутреннего развития объектов [1, 2, 3]. К настоящему времени развито моделирование различных процессов во многих научных областях, в том числе в экономике [4], социологии [5, 6, 7], политологии [8], психологии [9, 10], истории [11], географии [12]. Однако, несмотря на такое широкое распространение, не только в гуманитарных, но и в естественно-технических науках вопрос автоматизации процесса принятия решения до сих пор актуален. Недостаточная эффективность принимаемых решений остро ставит вопрос разработки новых моделей, алгоритмов и методов решения системных задач, в частности, когда речь идет о сложных слабоформализованных системах, обеспечение оптимальной работы и безотказного функционирования которых является приоритетной задачей во многих областях науки и практики. Для систем данного типа характерно отсутствие информации о принципах работы, свойствах и взаимосвязях элементов. На начальном этапе исследователи допускают их описание моделью: $(X^T = \{x(t)\}, Y^T = \{y(t)\}, t \in T)$, где T – упорядоченное множество моментов времени t ; X^T – множество входов X на T ; Y^T – множество выходов Y на T (рисунок 1).



Рисунок 1 – Модель системы типа «черный ящик»

При этом информация о работе системы представляет собой данные, полученные путем измерения (наблюдения или определения) состояний ее элементов, а правило отображения $y(t) = f(x(t))$ неизвестно. Прогнозирование неустойчивого состояния систем и оперативное принятие решений относительно

мер стабилизации их работы требует применения математических моделей и методов, основанных на обработке указанных данных, которое зачастую затруднено ввиду неформализованности процесса функционирования системы, нелинейности, нестандартности закона распределения. В настоящее время для поддержки принятия решений в области слабоструктурированных и трудно формализуемых задач используют эвристические методы, метод анализа иерархий, статистические методы, методы теории дифференциальных уравнений, методы анализа временных рядов и другие методы [13, 14]. Описание такого рода задач, как правило, не ограничивается составлением одной модели, приводя к тому, что получаемые от применения разнообразных математических методов моделирования выводы относительно одной и той же сложной системы разнятся [15]. Кроме того, конкретные математические модели и созданное на их базе программное обеспечение по поддержке принятия решений ориентированы на постановку и решение задач в определенной предметной области и не рассчитаны на решение разнотипных задач и задач из других предметных областей. Таким образом, возникает необходимость развития и внедрения математических моделей и методов их исследования, общих для различных сложных систем, а также разработки эффективных вычислительных методов и создания программных продуктов поддержки принятия решений на основе междисциплинарного подхода.

Отправной точкой концепции универсальных моделей и методов стали работы и структуралистские идеи А. А. Богданова [16, 17], Л. Берталанфи [18], А. Рапопорта [19], У. Р. Эшби [20], К. Боулдинга [21], Н. Винера [22], о междисциплинарном характере которых говорит сфера интересов их авторов. В них рассматриваются: типы отношений между элементами систем, а не типы составляющих их элементов; свойства структуры систем, а не свойства их функций. Развитие теории систем в этом направлении привело к формированию системологии и соответствующей методологии. Ключевые результаты в этой области были достигнуты Джорджем Клиром [23, 24].

В системологии Клира особое внимание уделяется глубинным связям, а ее методы нацелены на установление параметрически инвариантных характеристик систем, разработку на их базе автоматизированных методов решения системных задач и принятия оптимальных решений. Формальное описание системы в первом приближении: $\hat{S} = (A, R)$, включает элементы системы A и отношения между ними R . После преобразования состояний исследуемых свойств к конкретным переменным $A \rightarrow \dot{V}$, а от них к обобщенным $\dot{V} \rightarrow V$, рассматриваются следующие типы систем: нейтральные (рисунок 2а), направленные (рисунок 2б) и направленные системы вырожденного типа (рисунки 2в, 2г): $v_i | i \in \overline{1, n}$ – переменные системы; функция $u: N_n \rightarrow \{0, 1\}$ задает объявление переменных системы в качестве входных или выходных.

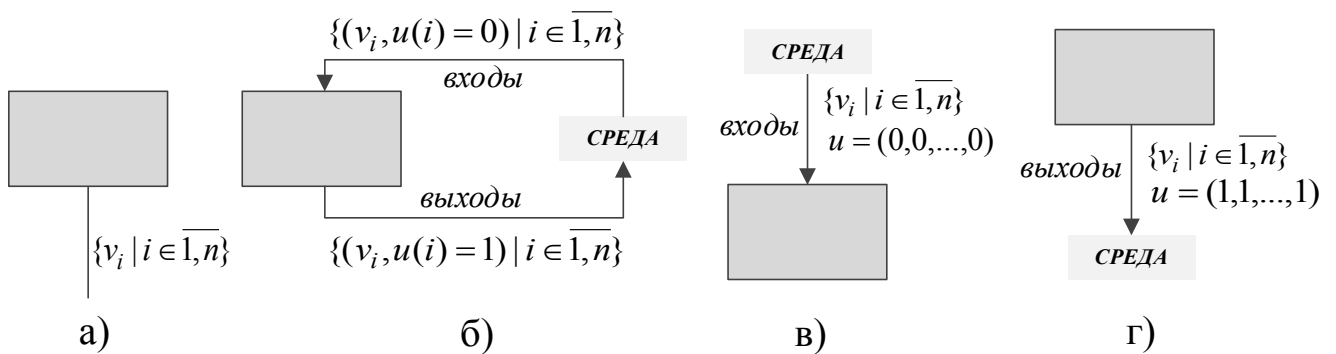


Рисунок 2 – Типы исходных систем

Так, процесс моделирования и решение системных задач включает переход от конкретного объекта к свободно интерпретируемым и контекстно-независимым системам. Системы, при этом, организованы в единую иерархию, как и методы решения задач, которые имеют аналогичную соподчиненность и общий характер для каждого типа систем. Благодаря механизму последовательного отказа от семантики осуществляется переход от конкретных систем к общей системе-представителю эпистемологического уровня, на основе которой производится выбор соответствующих математических методов.

Внедрение методов и алгоритмов системологии Клира не теряет актуальности с учетом высокой сложности современных систем, которая

затрудняет их изучение и применение (прежде всего, из-за ограничения ресурсов [25-28]), а также ввиду отсутствия единых методов исследования разнородных систем и решения задач: проектирования систем, которое предполагает выбор наиболее значимых свойств; декомпозиции, которая производится с учетом сделанного выбора; синтеза [29] (моделирование процесса объединения нескольких систем в общую, более сложную систему, дает возможность спрогнозировать ее дальнейшее успешное функционирование, так, если системы не совместимы на уровне математических моделей, их объединение может привести к нестабильной работе, разбалансировке функционирования).

Содержание системологии составляют междисциплинарные методы, позволяющие моделировать и исследовать системы различной природы, определять необходимость их замены в процессе работы. Математический аппарат уровня структурированных систем также включает методы поиска глубинных взаимосвязей между элементами систем, поиска оптимальной декомпозиции и агрегированной системы [30].

В области исследования систем с динамической структурой применение методов системологии, основанных на обработке эмпирических данных, описывающих поведение систем, особенно актуально, так как не требует перестройки блока моделирования и блока решения системных задач при динамическом изменении элементного состава и структуры системы. Однако, несмотря на широкую практику использования в решении междисциплинарных задач [31-41 и другие], предложенные Джорджем Клиром единые математические методы имеют свои ограничения: увеличение числа параметров системы приводит к критическому росту объема вычислительной обработки, такой тип роста характерен для методов структурированных систем; на предшествующем им эпистемологическом уровне не представлен алгоритм генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них. Моделирование сложных слабоформализованных систем и решение возникающих в области их исследования задач является актуальной и важной научной проблемой, решение

которой связано с развитием и реализацией системологических методов математического моделирования.

Цель работы состоит в развитии методов системологии Клира для исследования математических моделей неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой, представленных на эпистемологических уровнях, разработке и обосновании эффективных численных методов и алгоритмов решения системных задач. Достижение цели исследования позволяет осуществить реализацию указанных алгоритмов и методов в виде комплекса программ для оказания поддержки принятия решений.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы сформулированы следующие **основные задачи, требующие решения:**

1. Анализ соответствующих математических методов моделирования систем и принятия решений в области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой.

2. Построение математических моделей эпистемологических уровней порождающих и структурированных систем.

3. Создание численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них.

4. Разработка модифицированного численного метода структурированных систем.

5. Разработка компьютерных алгоритмов на базе моделирования исходных систем системологии, созданного численного алгоритма и модифицированного численного метода.

6. Создание комплекса программ, позволяющего осуществлять поддержку принятия решений относительно неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой за счет автоматизации решения системных задач.

7. Апробация программного комплекса и оценка его эффективности.

Объектом исследования в диссертационной работе являются системные задачи в области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой.

Предметом исследования являются математические модели, численные методы и алгоритмы решения системных задач и поддержки принятия решений в области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой.

Методы исследования. Методы диссертационного исследования основаны на фундаментальных методах теории вероятностей и математической статистики, численного анализа, теории информации, математического моделирования. При проектировании и реализации комплекса программ применены методы объектно-ориентированного программирования.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Математические модели эпистемологических уровней порождающих и структурированных систем.

2. Численный алгоритм генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, осуществляющий создание на базе исследуемой системы систем, порождающих состояния выборочных переменных, а также оценку их пространственной структуры на основе нечетких мер с учетом заданных исследователем параметров (вида обрабатываемой информации, типа системы, уровня сложности искомым систем, направления исследования матрицы данных).

3. Модифицированный численный метод структурированных систем, позволяющий определить значимые переменные системы, проводить декомпозицию и синтез систем. Разработанный метод отличается от оригинального метода Клира введением и учетом целевых переменных, учетом отклонения информационного расстояния гипотез от исходной системы, а также вводом ограничения на число шагов итеративной процедуры соединения. Развитие системологических методов исследования математических моделей систем, представленных на эпистемологических уровнях, позволило сократить количество численно обрабатываемых реконструктивных гипотез, формируемых на каждом шаге алгоритмов решения основополагающих задач системологии – задач идентификации и реконструкции, тем самым, расширить их применение в области поддержки принятия оптимальных решений.

4. Программные алгоритмы, эффективно учитывающие системологическую специфику реализации созданных математических моделей, численных алгоритмов и методов, дающих вычислительный результат без потери точности полученного с их помощью решения.

5. Комплекс программ для поддержки принятия решений, осуществляющий автоматизацию решения системных задач. Функционирует на базе созданных численных методов и алгоритмов и отличается: применением разработанных программных алгоритмов и программных классов моделей-представлений больших массивов данных; кроссплатформенностью; междисциплинарностью.

Научная новизна результатов проведенных исследований.

1. Разработана математическая модель порождающей системы, учитываются условия оптимальности, предъявляемые к системам на соответствующем эпистемологическом уровне; разработана математическая модель эпистемологического уровня структурированных систем, а также ее расширенная версия, которая отражает наличие целевых переменных и включает соответствие ограничениям, предъявляемым к информационному расстоянию системы.

2. Создан численный алгоритм генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, позволяющий осуществить выбор оптимального набора существенных характеристик исследуемого объекта на основе нечетких мер.

3. Разработан модифицированный численный метод структурированных систем, позволяющий определить значимые переменные системы, проводить ее декомпозицию, агрегирование, прогнозировать состояние системы и принимать оптимальные решения в области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой.

4. Разработаны компьютерные алгоритмы, реализующие созданные численные алгоритмы и метод. Компьютерные алгоритмы математического аппарата исходных и порождающих систем, а также модифицированного численного метода структурированных систем учитывают особенности системологического подхода к моделированию и исследованию систем, решению системных задач. Указанные алгоритмы положены в основу программного

комплекса для поддержки принятия решений в области исследования и построения неоднородных слабоформализованных систем.

5. Показано качественное отличие решения системных задач, полученного посредством модифицированного численного метода структурированных систем, от решения системных задач численным методом структурированных систем Джорджа Клира, подтверждающее эффективность предложенных в диссертационной работе численных методов и алгоритмов.

В диссертационной работе на основе разработанных математических моделей, алгоритмов и методах исследованы динные гемограмм, этологическая система, выполнено математическое моделирование процесса синтеза систем, осуществлено решение задач поиска глубинных взаимосвязей элементов системы, декомпозиции и объединения систем.

Теоретическая и практическая значимость результатов проведенных исследований. Теоретическая и практическая значимость результатов и методов диссертационного исследования заключается в использовании созданных математических моделей при исследовании сложных слабоформализованных систем в независимости от предметной области. Разработаны эффективные численные алгоритмы и метод, позволяющие решать системные задачи. Представлены результаты вычислительных экспериментов на основе компьютерного моделирования и численного исследования систем с применением разработанного программного комплекса. Реализация научных результатов и выводов подтверждается актами внедрения и практического использования.

Теоретическая значимость:

1. Разработанные математические модели, численный алгоритм генерации и поиска оптимальных порождающих систем и модифицированный численный метод структурированных систем позволяют решать следующие задачи: поиск глубинных связей между элементами сложной слабоструктурированной системы на основе реконструктивного анализа; оптимальной декомпозиции системы на подсистемы различного уровня сложности; объединения систем в согласованную полную систему с выводом заключения о совместимости подсистем в рамках

гипотезы; выбор существенных свойств системы на базе установленных параметрических свойств системы и структуры связей между ее переменными и параметрами.

2. Создание численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска их оптимальных вариантов позволяет унифицировать численные методы эпистемологического уровня порождающих систем с целью расширения практики их использования и внедрения, а также обеспечения возможности программной реализации и перспективы совершенствования.

3. Авторская модификация численного метода структурированных систем Клира для решения системных задач позволила сократить число обрабатываемых реконструктивных гипотез, таким образом, ускорить расчетную часть и расширить внедрение системологической методологии в область исследования систем.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в программной реализации в виде комплекса теоретически значимых для задач моделирования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой научных результатов диссертационного исследования, усовершенствующих методы системологии, а также в практическом применении созданного программного комплекса для поддержки принятия решений. Спроектированный и реализованный автоматизированный программный комплекс осуществляет процесс обработки информации и решение системных задач на основе созданных в диссертационной работе математических моделей, численных и компьютерных алгоритмов и методов. Разработанные программные модули в составе комплекса, представляя собой открытые системы, могут применяться в качестве основы или дополнительных модулей для программных продуктов по поддержке принятия решений в различных областях.

Область исследования. Область исследования и содержание диссертационной работы соответствует формуле специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки). Область исследования соответствует

п.2. «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей», п.3. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п.4. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Обоснованность и достоверность полученных при проведении исследований научных результатов обусловлены корректным применением апробированных математических методов теории вероятностей, математических методов количественного описания информации теории информации, математических методов системологии, применением современных компьютерных технологий. Корректность разработанного численного алгоритма и модифицированного численного метода, возможность их использования для исследования и оценки математических моделей неоднородных слабоформализованных систем подтверждается согласованностью выводов вычислительных экспериментов с результатами других авторов и результатами численного моделирования, апробацией полученных результатов в виде докладов на научных конференциях и публикаций в открытой печати.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VIII Научная конференция молодых учёных и студентов «Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах» (г. Краснодар, 2011 г.); IX Научная конференция молодых учёных и студентов «Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах» (г. Краснодар, 2012 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Экономика знаний: проблемы управления формированием и развитием» (г. Краснодар, 2014 г.); V международная научно-практическая конференция «Академическая наука – проблемы и достижения» (North Charleston, USA, 2014 г.); VI международная научно-практическая конференция «Фундаментальная наука и технологии –

перспективные разработки» (North Charleston, USA, 2015 г.); Международная заочная научно-практическая конференция «Перспективы развития научных исследований» (г. Душанбе, Таджикистан, 2016 г.); Международная заочная научно-практическая конференция «Научная мысль XXI века» (г. Кишинев, Молдавия, 2016 г.); Международная заочная научно-практическая конференция «Теория и практика научных исследований» (г. Астана, Казахстан, 2016 г.); Международная заочная научно-практическая конференция «Новое слово в науке и образовании» (г. Минск, Белоруссия, 2016 г.); Международная заочная научно-практическая конференция «Приоритетные научные направления в XXI веке» (г. Прага, Чехия, 2016 г.); Международная заочная научно-практическая конференция «Достижения современной науки» (г. София, Болгария, 2016 г.); XIII Всероссийская научная конференция молодых ученых и студентов «Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах» (г. Краснодар, 2016 г.).

Публикации. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 24 научные работы, включая 6 статей, которые опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Работы [42-49] выполнены автором самостоятельно. Из совместных работ [50-55], [56-62] в диссертацию вошли результаты, принадлежащие лично диссертанту.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы. Полученные в работе результаты внедрены на предприятии Акционерное общество «Конструкторское бюро «Селена», о чем имеется соответствующий акт (Приложение А). Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» кафедры теоретической физики и компьютерных технологий физико-технического факультета в рамках учебных дисциплин «Системология» и «Теория принятия решений» направления подготовки Информационные системы

и технологии очной формы обучения (копия акта об использовании в учебном процессе результатов работы приведена в Приложении А).

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. В диссертационной работе автором в полном объеме выполнены изложенные теоретические исследования и практические разработки. Все научные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. Постановка цели исследования и решаемых в диссертационной работе задач, обсуждение полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 181 страницу с 58 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 180 наименований.

Основное содержание работы.

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, определена цель, сформулированы задачи, требующие решения для достижения поставленной цели исследования. Введение содержит описание предмета, объекта и области исследования. Представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в диссертационной работе научных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой, проведен анализ средств и методов принятия решений относительно данного класса систем. Обосновано применение математических методов и моделей системологии в области исследования и моделирования указанных систем. Представлена методика решения системных задач, центральное место в которой занимает иерархия эпистемологических уровней систем и методов. Дано описание методологической базы, на которой строится математическое обеспечение диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке математического обеспечения решения системных задач в области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой и включает построение математических моделей эпистемологических уровней порождающих и структурированных систем. Проведено исследование возможности применения системологических методов в инструментальных средствах для поддержки принятия решений. Глава включает создание численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, а также разработку модифицированного численного метода структурированных систем, связанную с модификацией алгоритмов решения основных взаимодополняющих задач – реконструкции и идентификации, с целью устранения выявленных трудностей. Вторая глава также содержит описание процесса проектирования программного комплекса инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем, реализующего математический аппарат исходных, порождающих и структурированных систем. Показано полное соответствие построенных математических моделей систем фундаментальным принципам математического моделирования, что позволяет достичь основных целей моделирования систем. Дается определение и описание видов возникающих системных задач, решаемых методами системологии. Приводится структура программного комплекса, аналитическое описание функционирования его модулей.

В третьей главе диссертационной работы представлено описание спроектированных структурных схем функционирования программных модулей и экспериментальное исследование программного комплекса. Рассмотрен графический интерфейс пользователя, реализованный в терминах системологии. Дано обоснование выбора типа программного продукта, языка программирования и среды разработки. Глава содержит описание алгоритмов работы программных модулей, снимки окон программ, краткое описание разработанных специфических программных классов. Исследованы результаты апробации комплекса программ, проведен сравнительный анализ результатов, полученных

на основе разработанного модифицированного численного метода, с результатами, полученными методом, предложенным Джорджем Клиром, а также с выводами других авторов.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы проведенного диссертационного исследования.

Приложения включают: копии материалов, подтверждающих внедрение полученных результатов в практику; исходный код программной функции базовой процедуры соединения; копии свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Глава 1. Анализ методов принятия решений относительно неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой

Термин решение имеет множество определений и, в конечном счете, представляет собой наилучший выбор [42]. На сегодняшний день при всех стараниях исследователей полная автоматизация процесса принятия решений не имеет широкого внедрения и такой выбор производится при помощи человеко-машинных систем поддержки принятия решений (СППР), экспертных систем (ЭС), программных инструментальных средств. СППР включают комплекс технических средств, набор математических моделей и методов (математический аппарат), подсистемы анализа проблемы и выработки решения [63, 64]. Определений и классификаций СППР множество, однако их объединяет класс задач – это задачи с множеством критериев и большим массивом количественных данных, для решения которых применяются конкретные математические методы принятия решений [65, 66, 67, 68], аналогично для Веб-СППР [69-73]. При этом систем, которые были бы ориентированы на решение задач, описываемых субъективными моделями с превалированием качественных данных, среди СППР меньше, впрочем, как и СППР с блоком принятия решений, рассчитанным на более чем одну предметную область. В свою очередь, ЭС составляют компьютерные системы хранения и представления знаний высококвалифицированных экспертов с целью их использования в процессе принятия решений. ЭС включают: компонент получения знаний – базу знаний, в которой осуществляется хранение знаний экспертов, электронных документов, нормативно-технической документации, специализированной литературы и тому подобное; решатель проблемы – модели поведения экспертов и интерпретатор правил, который выполняет поиск решений; рабочую память – базу данных, хранящую исходные и промежуточные данные задачи, решаемой в данный момент; интерфейс взаимодействия – объясняющий компонент: представление знаний с использованием заложенного в ЭС языка представления знаний. ЭС используются и для решения неформализованных задач, однако чаще они ориентированы на задачи из конкретной предметной области, то есть являются

проблемно-ориентированными. На практике ЭС применяются в том числе для оценки состояния технических систем там, где выработаны строгие правила принятия решений, например, для обнаружения неисправностей в гидроэлектростанциях. ЭС могут использоваться как самостоятельно, так и в рамках СППР для введения в систему правил по выбору метода решения. Назначение инструментальных средств отличается от вышеперечисленных систем. Программные инструментальные средства разрабатываются для формализации используемых лицом, принимающим решение, методов оценивания (математизация методов экспертных оценок) и самого процесса принятия решения (создание объективных моделей). В отличие от СППР и ЭС, программные инструментальные средства предоставляют возможность разработки и модификации, анализа и тестирования различных систем.

1.1 Особенности математического моделирования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой

Математическое моделирование сложных систем предполагает разграничение системы в качестве перманентного объекта на некотором промежутке времени и тех из его свойств, которые представляют наибольший интерес и будут включены в процесс исследования. Высокая эффективность моделирования систем и дальнейшего применения моделей, полученных при помощи тех или иных математических методов, достигается при определении конкретного класса, к которому относятся указанные системы. Выделение специфических признаков систем, характерное для классических методов исследования, необходимо для выбора соответствующих средств моделирования, решения задачи идентификации системы и системных задач. Понятие слабоформализованной системы базируется на понятии сложной системы. Сложность состоит в многозначности состояния системы, слабой предсказуемости развития, трудности понимания протекающих в ней процессов. На сегодняшний день понятие сложных систем и их различные классификации определены многими исследователями [74, 75, 76, 77 и другие].

Слабоформализованные системы представляют собой сложные нелинейные системы, не имеющие четкой структуры и характеризующиеся наличием разнородных элементов и скрытых взаимосвязей между ними. В процессе моделирования слабоформализованных систем могут быть определены конкретные свойства, к ним относящиеся:

1. Отсутствие сведений о законе функционирования системы.
2. Сложная организационная структура, которая выражается в сложности определения четкого подчинения элементов и трудности последующего разбиения полной системы на подсистемы.
3. Сложные формы взаимодействия элементов системы, которые могут привести к труднопрогнозируемому поведению системы в целом.
4. Наличие синергетического эффекта при объединении систем.

Решение некоторых задач, связанных с качественными характеристиками слабоформализованных систем, традиционными методами теории принятия решений оказывается неэффективными [78], например, в области исследования целенаправленного поведения систем [79]. Выделение неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой (*НССДС*) в качестве обособленного типа систем необходимо для разработки новых и модификации существующих методов решения связанных с ними системных задач.

НССДС обладает всеми вышеперечисленными свойствами, однако они обладают и дополнительными признаками. Одним из таких признаков является неоднородность. Неоднородность систем выражается в том, что системы могут содержать качественные и количественные элементы, информация о которых получена посредством четкого или нечеткого канала наблюдения. При этом система (по существу, система типа «черный ящик») может быть нейтральной или направленной. Еще одним признаком *НССДС* является динамическая структура. Под динамической структурой понимается возможность изменения состава системы за счет гибкой структуры. Это означает, что элементы системы могут меняться путем добавления, исключения из состава системы, изменения их природы и так далее. Данный класс, вне зависимости от видового разнообразия

элементов систем, требует, чтобы разрабатываемые методы их моделирования адаптировались «на лету» к изменению структуры. Важнейшим вопросом является исследование возможности моделирования *НССДС* основными методами теории принятия решений и исследования систем.

Эвристические методы представляют собой способы нахождения и реализации различных решений путем общения и переговоров группы специалистов с использованием разнообразных приемов. Они базируются на знаниях и опыте участников группы, с помощью которых извлекают новую существенную информацию [80, 81]. Основные методы данного направления – это методы активизации технологии творчества. Эвристические методы не предполагают математического моделирования, они могут применяться на этапе выделения целей исследования, составления примерного перечня свойств, включаемых в проектируемую систему. При этом их использование на перечисленных этапах сопряжено с некоторыми недостатками: поиск ведется практически простым перебором вариантов; метод недостаточно формализован, отсутствуют четкие правила работы; абсурдность поисков возводится в принцип; не проработаны критерии оценивания уровня выдвигаемых идей, что может привести к отклонению и, в конечном счете, потере верного направления решения; полученные результаты чрезвычайно сильно зависят от подготовки и проведения методов, больше половины успеха зависит от руководителя группы.

Формализованные методы. Методы данной группы составляют: способы действий, основанные на строгом соблюдении заранее заданных правил и алгоритмов; расчеты по формулам, математическим зависимостям [82]. По определению в состав формализованных методов могут быть включены статистические методы, методы математического программирования и другие. Одним из представителей формализованных методов является *параметрический метод*. Метод предназначен для обнаружения физических противоречий в составе исследуемой системы и их последующего устранения. Физическим противоречием является наличие требований к элементу рассматриваемой системы, которые носят взаимоисключающий характер. Следовательно,

складывается ситуация, в которой параметру одновременно должны быть присвоены два отличных значения. Такой параметр носит название узлового, а элемент системы, соответствующий указанному параметру, называется узловым элементом. Выход (разрешение противоречия) состоит в замене узлового элемента некоторым объектом, удовлетворяющим закрепленным в физическом противоречии требованиям. Базу данных метода составляют системы, реализующие различные функции в соответствии с требованиями некоего физического противоречия. В работе [83] приемы по устранению выявленных противоречий представлены таким образом, что вероятность успешного устранения физического противоречия имеет обратную зависимость от номера приема. Если метод включает организацию базы данных, то в нее добавляются множества объектов с парными свойствами, их описание и условия реализации. Однако при исследовании *НССДС* информация о законах функционирования и описание свойств системы отсутствует, отсюда возникает главная трудность применения метода – формирование базы данных метода.

Морфологический метод. Содержание метода предполагает отбор некоторых признаков системы, которые соответствуют ее компонентам или свойствам и от которых зависит решение исследуемой проблемы. Таким образом, после точной формулировки задачи следует определение морфологических признаков, то есть тех признаков объекта, от которых зависит достижение цели исследования. Каждому признаку должен быть сопоставлен список его альтернативных проявлений. С целью облегчения дальнейшего поиска полученные списки объединяют в таблицу – морфологический ящик. Затем для поиска различных вариантов решения производится последовательное рассмотрение всех сочетаний альтернатив. Дальнейший анализ по каждому из сформированных признаков выполняется по матрице для вариантов решения. Непосредственный выбор наиболее оптимального решения осуществляется после определения функциональной ценности полученных решений.

Специфические характеристики *НССДС*, такие как динамическое изменение состава и структуры системы, сложно определяемые взаимосвязи между ее

элементами, затрудняют применение метода ввиду необходимости генерации нового морфологического ящика и матриц решений в рамках жизненного цикла системы. Кроме того, на сегодняшний день не разработан общий эффективный метод оценки оптимальности вариантов решения, полученных морфологическим методом.

Усовершенствованием морфологического метода стал *комбинаторный метод*, в котором с помощью анализа объекта определяют так называемый рабочий орган, состоящий из минимального набора элементов. Далее формируются перечни вариантов исполнения каждого отдельного признака рабочего органа и их составных частей (при необходимости образуют другие перечни). Если сформированы сопоставимые перечни, они могут быть объединены [84]. Полученные решения проверяют на работоспособность, прошедшие проверку решения оцениваются с помощью перечня целей объекта. Комбинаторный метод минимизирует возможные результирующие альтернативы за счет оптимизации рабочего органа, но это не решает указанных выше трудностей применительно к *НССДС*, так как остается привязка к составу и структуре исследуемой системы. Существует еще один вариант метода, который состоит в переходе от исходной задачи к задаче формирования принципов действия, которая решается методами, имеющими базу знаний, элементы которой представляют собой эффекты. Поиск решения осуществляется посредством комбинирования элементарных эффектов в соответствии с некоторыми правилами, обеспечивающими их взаимную согласованность и выполнение условий задачи.

Метод анализа иерархий так же относится к формализованным методам и основан на суждениях и экспертных оценках как отдельных участников процесса принятия решений, так и групп участников [85]. Решение – количественную оценку возможных альтернатив – получают путем математической обработки экспертных оценок, основанной на матричных вычислениях и аддитивном способе свертки критериев. После проведения анализа проблемной ситуации метод анализа иерархий предполагает ее структурирование и представление в

виде иерархии, на нижнем уровне которой располагаются альтернативы (объекты выбора), а вершина представлена конечной целью. Простейший случай – описывающая соответствующую задачу выбора трехуровневая иерархия: цель, критерии, альтернативы. В иерархии действуют всевозможные связи. Различные виды возможных иерархий представлены в работе [86]. Анализу подвергаются элементы иерархии, начиная со второго уровня, точнее, анализируется матрица, составленная методом попарных сравнений на основе шкалы субъективных суждений [85, 87]. Метод анализа иерархий довольно распространен и лежит в основе информационных систем поддержки принятия решений [88, 89, 90], имеет ряд достоинств и недостатков [46]. Решение задач методом анализа иерархий базируется на значении экспертных оценок и в ситуации нарушения однородности матрицы парных сравнений эксперту необходимо провести более глубокое исследование задачи, проанализировать свои суждения, уточнить статистические данные или, в конце концов, провести эксперимент заново. Несмотря на вероятность выявления нарушений, допущенных при построении матриц парных сравнений, не допускается корректировка матрицы на основе условий согласованности, это может привести к искажению экспертных предпочтений. Принятие решения группой участников остро ставит еще два вопроса: 1) Как агрегировать индивидуальные суждения в группе в единственное суждение всей группы? и 2) Как построить групповое предпочтение из индивидуальных предпочтений? Ответ на второй вопрос (обратное свойство) играет важную роль в объединении суждений нескольких лиц для получения единственного группового суждения. Суждения должны быть объединены так, чтобы величина, обратная обобщенным суждениям, равнялась обобщению обратных величин этих суждений. Было доказано, что использование среднего геометрического, а не часто применяемого среднего арифметического, является единственным способом выполнить это условие. Если лица, принимающие решение, являются экспертами, они могут отказаться объединять полученные ими суждения, выразить желание объединить только полученные ими по их собственной иерархии окончательные результаты. В этом случае учитывается

среднее геометрическое конечных результатов. При этом суждения (либо конечные результаты) экспертов, имеющих различные приоритеты важности, возводятся в степень их приоритетов, с последующим вычислением среднего геометрического [91].

Применение статистических методов в моделировании НССДС.

Дисперсионный анализ позволяет определить наличие воздействия каждого рассматриваемого фактора и их взаимодействия на исследуемый показатель на некотором уровне значимости, а также существенность этого воздействия. Воздействие факторов может быть систематическим (фиксированным), случайным и смешанным. Достоверность нулевой гипотезы (об отсутствии влияния факторов на исследуемую переменную и об отсутствии взаимодействия факторов) проверяется сравнением результатов отношений средних квадратов с табличными значениями F -критерия Фишера-Снедекора [92]. Естественно, сложность и объем вычислений возрастают с увеличением количества регулируемых факторов; этот барьер преодолен в пакете программ STATISTICA, который позволяет решать множество задач дисперсионного анализа различного уровня сложности [93, 94]. Моделирование НССДС методами дисперсионного анализа ограничено тем, что он применим в случае нормального распределения исследуемого показателя (а это возможно, только если все факторы процесса известны). Допускаются некоторые отклонения от таких предпосылок дисперсионного анализа, как нормальность распределения исследуемой переменной и равенство дисперсий в ячейках. Так, при равном числе наблюдений в ячейках небольшие отклонения от указанных предпосылок не окажут значимого влияния на результаты анализа. При неравном числе наблюдений в ячейках они могут сильно воздействовать на итоги эксперимента и усложнить вычисления, поэтому вместо недостающих данных следует воспользоваться средними значениями других наблюдений в ячейках; искусственно введенные данные не учитывают при расчете числа степеней свободы. При этом результаты исследования будут иметь несколько искаженное значение. Однако даже переход от исходной задачи к задаче с некоторыми допущениями и искажениями не

решает проблему адаптации полученной модели к гибкой структуре и неоднородности НССДС.

Корреляционный анализ позволяет определить наличие корреляционной связи [95]. Основная его характеристика – коэффициент корреляции, увеличение значения которого, указывает на усиление связи между случайными величинами. Если исследуется несколько случайных величин, то формируют квадратную корреляционную матрицу с элементами равными коэффициентам корреляции, при этом диагональные элементы равны единице [84]. Коэффициенты корреляции подразделяются на параметрические (учитывают параметры распределения) и непараметрические (включают в расчеты ранги).

Параметрические коэффициенты корреляции. Для оценки зависимости между двумя переменными чаще всего используют коэффициент корреляции Пирсона. Для его вычисления необходимо, чтобы сравниваемые переменные X, Y были измерены в интервальной шкале (или шкале отношений), имели одинаковое число вариаций, были распределены нормально, а связь между ними имела линейный характер [96]. Если распределение переменных значительно отличается от нормального, то в этом случае равенство нулю теоретического коэффициента корреляции еще не говорит о действительной независимости этих величин. Причинами невыявления связи может быть: ее нелинейность; наличие выбросов (так как используется среднее, а на его величину влияет каждое значение, то коэффициент чувствителен к выбросам – экстремально малым/большим значениям переменной); неоднородность выборки.

Непараметрические показатели связи основаны на принципе нумерации значений статистического ряда, при этом коррелируются ранги показателей X, Y , а не их значения. Непараметрическими аналогами коэффициента корреляции Пирсона являются: коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ_{xy} , коэффициент Кендалла τ и γ -коэффициент. *Коэффициент корреляции τ - Кендалла* характеризует меру линейной связи между случайными переменными. Вычисление значения коэффициента предполагает выполнение ряда требований: сравниваемые величины получены в порядковой шкале; число варьирующихся

признаков в X, Y одинаково. Величина коэффициента корреляции τ - Кендалла не зависит от закона распределения величин x, y , но, тем не менее, если переменные имеют нелинейную зависимость, то коэффициент корреляции уменьшается. Он менее чувствителен к выбросам, вычисляется проще, чем коэффициент ρ_{xy} - Спирмена, однако, с увеличением выборки объем вычислений возрастает быстрее. *Коэффициент ранговый ρ_{xy} - Спирмена* может быть использован при значительном отклонении от нормального распределения любой из переменных. Коэффициенты ранговой корреляции позволяют работать с нелинейными, но монотонными зависимостями. *Бисериальный коэффициент корреляции* предполагает, что сравниваемые переменные измерены следующим образом: X – в дихотомической шкале, Y – в шкале интервалов или отношений. Переменная Y должна иметь нормальный закон распределения, число варьирующихся признаков в X, Y должно быть одинаковым. Для оценки уровня значимости используется таблица критических значений t -критерия Стьюдента. Для вычисления *рангово-бисериального коэффициента* сравниваемые переменные должны быть измерены: X – в дихотомической шкале, Y – в ранговой шкале, число варьирующихся признаков в сравниваемых переменных должно быть одинаковым. Для оценки уровня значимости также применяют таблицу критических значений t -критерия Стьюдента.

Непараметрические критерии обладают рядом достоинств при использовании в моделировании слабоформализованных систем. Во-первых, не требуется предварительного знания вида исходного распределения. Во-вторых, их можно вычислить, опираясь на небольшой объем исходных данных. В-третьих, к ним предъявляются меньшие требования по сравнению с соответствующими параметрическими коэффициентами. Между тем, у применения непараметрических коэффициентов есть и недостатки, например, меньшая статистическая мощность и меньшая гибкость, чем у их параметрических аналогов. Если требуется выявить скрытые связи между элементами сложных систем, то к выбору статистики критерия необходимо подходить особенно внимательно, для обеспечения гарантий правильности результата исследования

следует вычислить несколько различных коэффициентов, сравнить полученные результаты, если они противоречат друг другу, попытаться выявить причину противоречий.

Корреляционное отношение Пирсона. Так как коэффициент Пирсона не пригоден для оценки в условиях негауссовых распределений анализируемых переменных, то в этом случае силу связи между случайными величинами можно попытаться установить корреляционным отношением Пирсона. Корреляционное отношение описывает связь между X, Y как со стороны X к Y , так и со стороны Y к X . В корреляционное отношение входят два показателя, которые рассчитываются отдельно друг от друга. Указанные показатели взаимосвязаны, так как при строго линейной зависимости они равны и совпадают с величиной линейного коэффициента корреляции Пирсона.

В общем случае корреляционный анализ обычно предшествует регрессионному. В результате выполнения корреляционного анализа производится выбор существенных факторов, которые и вводятся в уравнение регрессии. Корреляционным анализом определяется наличие, сила и направление взаимосвязи между переменными, включаемыми в модель, а регрессионным – вид математической функции зависимости переменных модели.

Парный коэффициент корреляции определяет тесноту связи только при условии, что зависимость между переменными имеет линейный характер. Наличие высокой корреляции между регрессорами во множественной регрессии приводит к возникновению явления мультиколлинеарности, при котором оценка коэффициентов модели, полученная методом наименьших квадратов, имеет неустойчивый характер. Такая линейная зависимость аргументов модели приводит к тому, что матрица парных коэффициентов корреляции имеет определитель близкий к нулю. Мультиколлинеарность также вызывает завышение значения множественного коэффициента корреляции. Проверка адекватности модели множественной регрессии трудоемкий процесс, занимающий много времени даже компьютерными методами. Ввиду невыполнения необходимых требований, например, требования нормальности распределения ошибок, прогноз

на основе регрессионных моделей, произведенный методом наименьших квадратов, может быть неадекватным. Такая регрессионная модель является искаженной и неустойчивой к добавлению новых наблюдений и факторов, что выражается в резком изменении оценок параметров модели. В этой ситуации необходимо переопределить набор переменных, которые входят в математическую модель. Для этого используются как методы полного перебора, так и пошаговые методы, однако ни один из этих методов в конечном итоге не обеспечивает оптимального набора переменных. Строгие правила, отвечающие на вопрос о том, какие переменные оставлять, а какие исключать, не выработаны.

Многомерный корреляционный анализ применяется для выявления и оценки тесноты связи между случайными переменными, значения которых распределены по многомерному нормальному закону. В рамках метода производится оценка корреляционной матрицы путем определения матрицы выборочных коэффициентов корреляции [92]. Для качественного исследования необходимо знание глубоких взаимосвязей параметров процесса и их причинности. Однако, наличие корреляции не позволяет установить причинного характера связи, при исследовании сложных систем возможна и ложная корреляция (нонсенс-корреляция), то есть необъяснимая связь между переменными, основанная исключительно на их количественном соотношении. Еще одна особенность – это отсутствие стандартного критерия проверки выполнения требования нормальности многомерного распределения переменных (отнесение к совместному нормальному закону возможно, если переменные имеют нормальный закон распределения). На значение коэффициента корреляции также оказывают влияния выбросы, их наличие может привести как к неоправданному увеличению значения коэффициента корреляции, так и к уменьшению существующей корреляции. Задача нахождения выбросов в целом носит субъективный характер и ее решение зависит от содержания и условий конкретного эксперимента.

Многомерный регрессионный анализ занимается исследованием зависимости рассматриваемой переменной от нескольких переменных системы, а также

требует проведения оценки взаимосвязи между зависимой и совокупностью независимых переменных и проверки значимости уравнения множественной регрессии. Для этих целей используется множественный (совокупный) коэффициент детерминации R^2 , однако он имеет недостаток – добавление новых объясняющих переменных приводит к его увеличению, что никак не характеризует качество модели. Ввиду этого предпочтительнее использовать скорректированный коэффициент детерминации \hat{R}^2 [92]. Если же введение в модель новой объясняющей переменной по-прежнему приводит к увеличению \hat{R}^2 , то это еще не указывает на значимость ее коэффициента регрессии. Такой вывод о значимости может быть сделан при абсолютном значении t -статистики большем единицы.

Мультиколлинеарность – взаимная коррелированность объясняющих переменных – проявляется и в регрессионном анализе в функциональной и стохастической формах. При функциональной форме хотя бы одна парная связь между объясняющими переменными представляет собой линейную функциональную зависимость, что приводит к нарушению предпосылок многомерного регрессионного анализа, делая невозможным поиск решения системы нормальных уравнений, а значит и оценку параметров регрессионной модели. Как правило мультиколлинеарность является стохастической, при которой как минимум две объясняющие переменные в модели сильно коррелируют. Выражается она в значительных средних квадратических отклонениях коэффициентов регрессии b_0, b_1, \dots, b_n , что приводит к неадекватности оценки их значимости по t -критерию [92]. Хотя по F -критерию регрессионная модель может оказаться значимой, однако такое уравнение регрессии не имеет практического смысла. На сегодняшний день разработано множество методов устранения мультиколлинеарности, безусловно, связанных с дополнительными вычислениями.

В отличие от вероятностных моделей, где оценивают вероятности, при анализе моделей временных рядов оценивают коэффициенты функции по времени. *Анализ временных рядов* дает возможность описать особенности ряда,

раскрыть алгоритм и произвести прогноз поведения ряда, построить модель динамики многих переменных во времени. Временной ряд может быть представлен в виде:

$$y_t = f(t) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где y_1, y_2, \dots, y_t ($t = \overline{1, T}$) – уровни временного ряда; $f(t)$ – детерминированная неслучайная составляющая, характеризующая основное направление развития ряда под влиянием непрерывно действующих факторов; ε_t – стохастическая составляющая, отражает случайные колебания процесса (шум).

Перед началом математического моделирования необходимо проверить, имеет ли ряд тенденцию. Моделирование выявленной тенденции ряда представляет собой его аналитическое выравнивание, то есть замену фактических уровней ряда расчетными уровнями, имеющими колебаний намного меньше, чем у исходных. Задача метода состоит в выборе кривой оптимального вида и оценке ее параметров. Далее строятся модели автокорреляции и авторегрессии. Корреляционная зависимость между соседними уровнями ряда (y_1 и y_2 , y_2 и y_3 , y_3 и y_4 , ...) носит название автокорреляции. Расчет степени автокорреляции дает возможность построения коррелограмм. Анализ коррелограмм позволяет определить особенности стохастического процесса, отраженного в исследуемом ряду, однако их дальнейшая интерпретация предполагает наличие опыта (в некоторых случаях интерпретация коррелограмм сильно осложнена и не может быть выполнена). Различают два типа автокорреляции временных рядов: автокорреляция уровней временного ряда y_t (зависимость уровней ряда); автокорреляция остаточной компоненты ε_t (зависимость ε_t от ее предшествующих значений). Расчет автокорреляции остаточной компоненты требуется ввиду того, что оценка параметров уравнения регрессии методом наименьших квадратов выдвигает условие нормальности распределения остаточной составляющей (математическое ожидание равно нулю, дисперсии есть константы, остатки являются независимыми).

Многомерные временные ряды. Для выявления зависимостей между процессами, развивающимися во времени, применяют многофакторные модели взаимосвязанных временных рядов, которые включают описание нескольких временных рядов с уровнями, относящимися к одинаковым временным отрезкам. Осуществляют математическое моделирование многомерных временных рядов с применением корреляционно-регрессионного анализа. При оценке взаимосвязи между рядами необходимо проверять, существует ли автокорреляция, при которой коэффициент корреляции между уровнями временных рядов имеет неоправданно завышенное значение (например, при наличии устойчивых тенденций в развитии явлений, то есть возможной автокорреляции в рядах). Для выявления действительной зависимости между анализируемыми рядами корреляционному анализу временных рядов должен предшествовать расчет коэффициента автокорреляции, при обнаружении автокорреляции необходимо ее устранить. Методы устранения автокорреляции нацелены на исключение из рядов основной тенденции [97, 98].

Прогнозирование с использованием временных рядов сводится к определению вида экстраполирующих функций $f(t)$ и ε_t на основе исходных эмпирических данных. Одним из способов прогнозирования является прогноз по тренду. Временной ряд в общем случае позволяет учитывать все реальные факторы, изменяющиеся во времени и влияющие на развитие процесса. Функция тренда имеет больший охват факторов, влияющих на изменение показателей процесса, по сравнению с регрессионными моделями, имеющими ряд ограничений на включение факторов в модель. Модель тренда – это модель динамики процесса, на основании которой и производится прогноз развития процесса. В свою очередь, модель многофакторной регрессии представляет собой модель вариации параметра в статической совокупности, которая объясняет не его изменение во времени, а отличие его от других параметров в данный период времени. В таком контексте прогнозирование по тренду имеет и недостатки, так, факторы развития процесса скрыты и, в отличие от регрессионной модели с

управляемыми факторами, нет возможности просчитать процесс при различных значениях факторов.

Прогнозирование на примере простой трендовой модели основано на уравнении модели с заменой номера периода на интересующий. Одной из характеристик точечного прогноза является равенство вероятностей попадания исследуемого показателя в зону большую или меньшую относительно прогнозного значения при нормальном распределении отклонений от тренда (обе вероятности равны 0,5). Указанный вид прогноза дает наиболее вероятное значение анализируемого показателя и, таким образом, представляет собой его среднее, медиану и моду. Наличие случайных колебаний уровней является источником ошибки репрезентативности выборочных оценок тренда, что следует учитывать при прогнозировании. При рассмотрении процессов с незначительными колебаниями исследование с применением точечного прогноза не требует никаких дополнительных исследований. Однако в слабоформализованных, нестабильных системах (например, в области социологии) процессы, лишенные колебаний, практически не встречаются. Прогноз относительно доверительного интервала, учитывающий колеблемость, подразделяют на три вида: уровня периода, среднего уровня периодов и линии тренда.

Кроме того, исследование систем методами анализа временных рядов сопряжено с некоторыми трудностями. Методы сглаживания имеют недостатки и поэтому используются больше для описания временного ряда, чем для анализа, так как между построенной функцией и моделью образования тренда отсутствует непосредственная связь. А поскольку после сглаживания результирующий временной ряд уменьшен относительно фактического, получается не очень надежная экстраполяция тренда. Относительно модели автокорреляции и авторегрессии существует некоторое противоречие в вопросе определения порядка модели при анализе авторегрессии. Возможно получение искаженного вывода при низком порядке за счет того, что в модели не будут использованы сведения о предыдущих моментах времени. К увеличению порядка модели также

необходимо относиться с осторожностью, так как может ухудшиться качество математической модели. Поэтому необходимо построение нескольких моделей, по которым и будет определен порядок анализируемой авторегрессионной модели. На первом этапе моделирования строится уравнение регрессии первого порядка $\hat{y}_t = a_0 + a_1 y_{t-1}$ и для него находится коэффициент автокорреляции. Затем строится модель второго порядка $\hat{y}_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2}$, для нее рассчитывается совокупный коэффициент автокорреляции R_1 . Если значение R_1 больше значения коэффициента автокорреляции первого порядка, то переходят к построению модели третьего порядка, которая требует вычисления совокупного коэффициента автокорреляции R_2 и его сравнения с предыдущим. Когда множественный коэффициент автокорреляции установится в постоянное значение при добавлении последующих уровней расчеты завершаются.

Наличие автокорреляции во временных рядах или в остаточных величинах приводит к тому, что оценки коэффициентов регрессии, основанные на методе наименьших квадратов, будут непригодны для анализа, так как автокорреляция увеличивает дисперсии коэффициентов регрессии, тем самым затрудняя построение доверительных интервалов для коэффициентов регрессии и проверку их значимости. Анализ многомерных временных рядов с использованием регрессионного анализа предполагает построения регрессионных моделей, при этом необходимо исключить причины таких явлений, как мультиколлинеарность: связь между признаками, ошибки в описании признаков, недостаточность статистических данных. Однако основной акцент делается на качество анализа, оно не должно пострадать. Еще одной сложной задачей при анализе рядов с применением регрессионного анализа является выбор формы связи.

Исследование НССДС методами математического программирования.

Основными методами математического программирования являются методы линейного, нелинейного, дискретного, динамического, стохастического программирования [99, 100]. При линейности целевой функции и заданных ограничений, одноэтапной операции нахождения функции эффективности, может быть использован один из методов линейного программирования [101]. Несмотря

на различные области приложения, постановка задачи метода имеет общую формулировку, а при ее решении используют общую идею: задается некоторое опорное (неоптимальное) решение, далее находится оптимальное решение путем изменения опорного решения в направлении приближения к оптимальному. Такой вид математического программирования наиболее разработан [102], в его основе лежит симплекс-метод различных модификаций [103]. Симплекс-метод имеет следующие особенности:

1. Применим только на линейных ограничениях и линейных целевых функциях. Не позволяет провести более гибкое исследование, работать со связями нелинейного характера.

2. Не определяет влияние переменных друг на друга, позволяет получить только их значения, минимум/максимум целевой функции.

3. Если параметры целевой функции или ограничения случайны, то такие задачи не относятся к задачам линейного программирования, так, если закон изменения варьируемых переменных неизвестен – методы линейного программирования неприменимы.

4. В табличном симплекс-методе каждая следующая таблица заполняется на основе данных из предыдущей, что приводит к затратам оперативной памяти компьютера, так как необходимо хранить данные предыдущей таблицы и постоянно их пересчитывать. Также при применении метода может происходить накопление ошибок округления в случае большого числа итераций.

5. Метод обратной матрицы (модифицированный симплекс-метод) позволяет уменьшить чрезмерное потребление оперативной памяти, однако допускает накопление ошибок в связи с нахождением обратной базисной матрицы, эта проблема не критична (существуют пакеты программ, оперирующие матрицами ограничений, включающими до десятков тысяч строк и миллионов столбцов).

Нелинейное математическое программирование применяется для оптимизации нелинейных функций при линейных и (или) нелинейных ограничениях. Общих методов решения нелинейных задач не разработано ввиду большого количества разновидностей нелинейности, так, область допустимых

решений может быть невыпуклой, иметь бесконечное число крайних точек, состоять из нескольких частей и так далее [104, 105, 106]. Подразделяются существующие методы решения нелинейных задач следующим образом:

1. Методы линеаризации путем разложения в ряд, логарифмирования и выполнения других математических действий над целевой функцией и заданными ограничениями для решения задачи методами линейного программирования.
2. Поисковые методы оптимизации, основанные на поэтапном получении допустимых решений нелинейной задачи по направлению к решению, ведущему к нахождению экстремума целевой функции.
3. Аналитические методы нахождения с заданными ограничениями требуемых значений целевой функции. Данная группа методов может быть использована в случае непрерывности искомых величин (наличия обоснованных предположений о непрерывности) и в тех случаях, когда заданные ограничения и целевая функция имеют частные производные второго или высшего порядка.

Распространены системы, в рамках которых требуется оптимизация входящих в них параметров с учетом выполнения условия дискретности принимаемых ими значений, например, если действительные значения параметров допускают представление только целыми числами. Для их математического моделирования применим метод дискретного программирования [107, 108].

Поиск решения посредством выполнения многоэтапных операций осуществляется с применением метода динамического программирования, в котором последовательно, от этапа к этапу, приходят к оптимальному решению, при этом учитывается влияние результатов каждого шага не только на оптимизацию, достигнутую на нем, но и на последующие этапы [109]. Математическое программирование указанного вида включает решение задач, структура которых представима в виде нескольких более простых подзадач с одной целевой функцией. Принцип решения состоит в построении схемы

вычислительного процесса, в которой производится динамическая замена одной задачи с большим числом переменных на несколько задач с минимальным числом переменных (как правило, одной). Такое построение возможно при удовлетворении следующих условий: а) критерий оптимальности аддитивен – решение задачи в целом складывается из оптимальных решений, полученных на каждом этапе метода; б) при принятии решения на каждом этапе результаты на последующих этапах должны быть независимы от предыдущего состояния системы. На всех этапах выполнения метода сопоставляются полученные варианты будущего развития системы для отбраковки нежизнеспособных из них (несмотря на такой отсев, объем вычислений остается большим). Таким образом, применение методов динамического программирования рекомендовано при решении задач, для которых возможно построение сетевого графика пошагового перехода к оптимальным состояниям переменных [110]. В том случае, если система состоит из параметров, характеризующихся случайными состояниями или реализующих случайные функции, то при решении системных задач используются стохастические методы математического программирования [111, 112].

Вышеизложенное исследование особенностей математического моделирования класса неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой показало необходимость разработки математических моделей, численных алгоритмов и методов, максимально учитывающих их характерные признаки и позволяющих получить достоверное оптимальное решение системных задач и адекватный прогноз будущего состояния системы.

1.2 Системологическая методология исследования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой и принятия решений

Проведенный анализ указывает на наличие ограничений методов, используемых для математического моделирования, которые при рассмотрении слабоформализуемых задач зачастую неприменимы либо полученное с их

помощью решение имеет сильно приближенный характер, что связано с нестатистическим видом взаимосвязей между параметрами задачи. Более того применение рассмотренных методов нередко требует построения новой математической модели в случае изменения, добавления, удаления элементов, включенных в рассматриваемую задачу. В целях унификации процесса математического моделирования систем и решения задач, возникающих при их исследовании, Джордж Клир предложил методологию решения системных задач на основе междисциплинарного подхода, позволяющую моделировать системы различной природы [39, 40, 113, 114, 115, 116, 117]. В первом приближении система – это абстрактное представление, различаемое наблюдателем в процессе взаимодействия с объектом. Исследование *НССДС* методами системологии проводится в несколько этапов. На начальном этапе система сводится к упорядоченной паре:

$$\hat{S} = (A, R), \quad (2)$$

где A – множество рассматриваемых элементов системы;

R – множество отношений между элементами A .

В общем случае классификация систем осуществляется по указанным критериям: по типу элементов; по типу отношений. Первый способ классификации основан на эксперименте, второй – на обработке данных. При этом значимые классы систем по второму критерию в системологии организованы в *иерархию эпистемологических уровней* [118]. Исследование каждого класса изоморфных систем со стороны определенных на нем отношений позволяет выразить его одной системой – представителем этого класса. Так, вводится *общая система* – неинтерпретированная система, описанная в некоторой стандартной формулировке. Класс систем эпистемологического уровня составляют системы, эквивалентные относительно выделенных практически значимых характеристик отношений. В рамках системологии математическое описание элементов методологии (переменные, параметры, системы-представители и другие) и их применения сделало возможным организацию систем в порядке их ранга, тем самым упрощая поиск методов решения системных задач. Такой подход

позволяет решать большое число задач небольшим количеством универсальных методов (которые также имеют свою иерархию).

Областью исследования системологии являются значимые для отдельных классов виды свойств отношений между элементами входящих в них систем. Несмотря на большое разнообразие вариантов систем, они образуют конечное число типов, соотносящихся с конкретным эпистемологическим уровнем и конечным набором соответствующих существенных методологических отличий.

Необходимость установления параметрически инвариантных характеристик систем и разработки на их основе автоматизированных методов принятия оптимальных решений послужила толчком к созданию системологической методологии. Важнейшей задачей системологии является разработка математических методов, позволяющих находить решение системных задач: в их естественной формулировке; без использования при решении упрощающих предположений или же с упрощениями, позволяющими решить задачу с минимальными искажениями. Методы решения системных задач выбираются так, чтобы лучше соответствовать исследуемой задаче. При решении сложных системных задач чаще всего приходится прибегать к упрощениям, которые снижают сложность процесса решения, но в то же время каждое из них сокращает диапазон возможных решений. Совокупность научных представлений, используемых для выдвигаемых гипотез и решения конкретных системных задач, называется методологической парадигмой. В самом общем виде парадигма задачи представляет собой парадигму без предположений относительно ее решения. Существуют и менее общие, но плодотворные парадигмы. Область исследования взаимосвязи методологических парадигм и классов системных задач называется метаметодологией систем, которая ставит перед собой следующие задачи:

- разработка парадигм, направленных на применение компьютерной обработки и нахождение баланса между качеством получаемого решения и сложностью численной процедуры его получения;
- разработка совокупности взаимодополняющих системных парадигм, с возможностью их совместного использования при решении одной задачи.

В системологии исследования проводятся с интенсивным использованием компьютера, выступающего в качестве методологического средства и экспериментальной лаборатории, при этом системные задачи решаются с точки зрения свободно интерпретируемого и контекстно-независимого подхода. Указанная методология предполагает переход от конкретных задач к обобщенным задачам [113, 117, 118]. Так, в выработке решения задействуется канал абстрагирования/интерпретации: заданная в терминах предметной области системная задача, пройдя этап абстрагирования, преобразуется к виду общесистемной задачи (путем исключения семантики с сохранением семантических связей в самом канале). Затем, с использованием математических методов системологии вырабатывается решение обобщенной системной задачи, после чего к полученному решению по каналу интерпретации возвращается семантика, то есть производится наполнение абстрактного общесистемного решения конкретным семантическим содержанием. Окончательное решение предоставляется исследователю на естественном языке. Таким образом, системные задачи – это содержательные задачи, для которых осуществимо операциональное описание и методы решения которых представляются весьма перспективными как для задач, возникающих в конкретных предметных областях, так и для междисциплинарных задач.

На рисунке 3 представлена общая схема принятия оптимального управленческого решения на основе системологии и место инструментальных средств в ней.

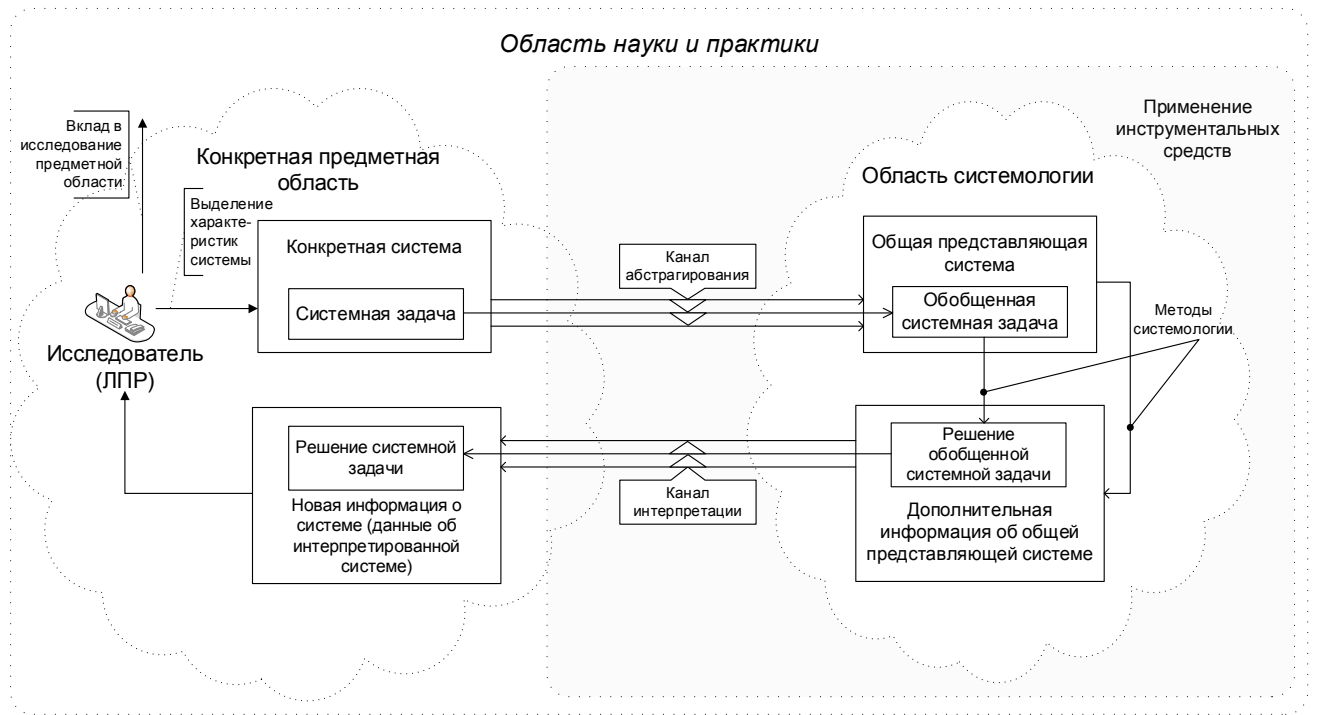


Рисунок 3 – Схематическое представление процесса принятия решения с применением методов системологии

Исследование эпистемологических уровней системологии и выбор методологической базы.

Иерархия эпистемологических уровней (рисунок 4) основывается на таких базовых понятиях как исследователь, объект исследования, их взаимодействие между собой и со средой. На нижнем уровне иерархии исследователь выбирает способ взаимодействия с объектом, воспринимаемым в качестве системы. В большинстве случаев этот выбор не произволен, поскольку определяется целью и условиями исследования, а также имеющимися знаниями о проводимом исследовании. Такой способ взаимодействия может быть описан несколькими альтернативными способами, в системологии система выражается через переменные (реальные свойства объекта или абстрактные свойства для математических систем) и их состояния (проявления свойств). Изменение состояния переменных осуществляется на параметрическом множестве, которое чаще представляет собой не статическую характеристику, а зафиксированные значения динамической характеристики (например, времени). В рамках инструментальных средств система нулевого (нижнего) эпистемологического

уровня представляет собой совокупность множества переменных, множеств их потенциальных состояний и метода, с помощью которого производится описание смысла переменных. Системы данного уровня носят название *исходных систем*, так как подобные системы представляют собой источник эмпирических данных. Классификация исходных систем, в свою очередь, осуществляется с учетом методологически существенных отличий в свойствах входящих в них переменных и параметров. Более детальная классификация возможна при учете отличий состояний переменных системы.

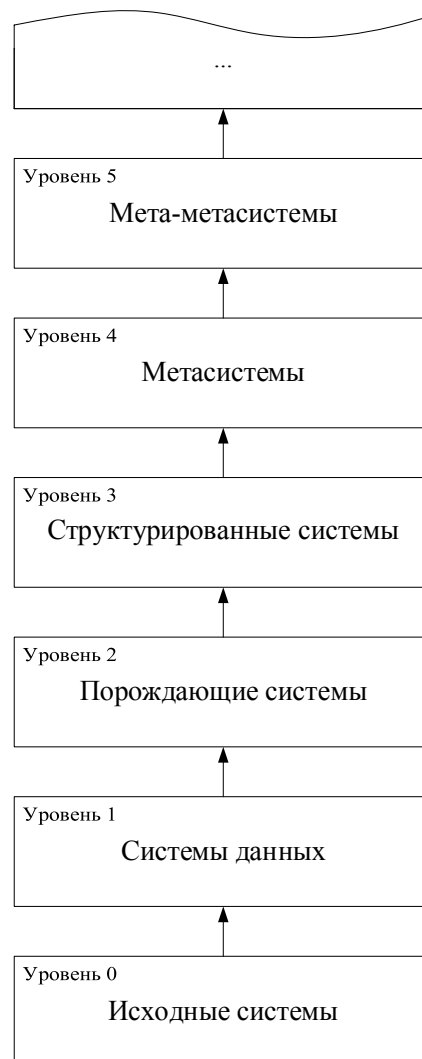


Рисунок 4 – Структура соподчинения эпистемологических уровней

Системам более высоких эпистемологических уровней доступны все сведения о системах нижестоящих уровней, кроме того, они содержат дополнительную информацию, недоступную системам низших

уровней (таблица 1). Исходная система, наполненная данными – действительными состояниями переменных, называется *системой данных* (система первого эпистемологического уровня). На следующем эпистемологическом уровне (втором уровне – уровне *порождающих систем*) параметрически инвариантная характеристика отношений представляется в виде некоторых ограничений, накладываемых на абстрактные переменные. Отдельные системы, определенные на предшествующих уровнях иерархии, могут соединяться на третьем эпистемологическом уровне по общим переменным или путем какого-либо другого способа взаимодействия. Такого рода интегрированные системы носят название *структурированных систем*. Элементы четвертого эпистемологического уровня – *метасистемы*, включают системы предшествующих уровней и инвариантную параметрам метохарактеристику, которая определяет изменения этих систем. Для перехода на уровень метасистем системы должны быть сформированы на основе единой исходной системы и определены на всех нижестоящих уровнях иерархии. На пятом эпистемологическом уровне множество параметров может быть изменено параметрически инвариантной характеристикой более высокого уровня (мета-метохарактеристика), а входящие в него системы называются *метасистемами второго порядка*.

Таблица 1 – Описание уровней иерархии эпистемологических уровней

<p>Уровни 4, 5 и выше. Метасистемы</p>	<p style="text-align: center;"><i>Взаимосвязь между отношениями, определенными на уровне 3.</i></p> <p>Метасистема представляется совокупностью систем, определенных на более низких уровнях, и характеризующей их изменение параметрически инвариантной метохарактеристикой.</p>
<p>Уровень 3. Структурированные системы</p>	<p style="text-align: center;"><i>Отношения между моделями уровня 0,1,2.</i></p> <p>Интегрирование систем, определенных на нижестоящих уровнях.</p>
<p>Уровень 2. Порождающие системы</p>	<p style="text-align: center;"><i>Модели отношений данных, определенных на уровне 1, и способов их порождения.</i></p> <p>Параметрически инвариантная характеристика отношений представляется в виде некоторых ограничений, накладываемых на абстрактные переменные системы данных.</p>

Продолжение таблицы 1

Уровень 1. Системы данных	<p style="text-align: center;"><i>Информация о системе, представленная на языке описания уровня 0.</i></p> <p>Исходная система, дополненная данными – состояниями переменных, полученными путем выбора интересующих возможных состояний или измерением наблюдаемых.</p>
Уровень 0. Исходные системы	<p style="text-align: center;"><i>Язык описания данных.</i></p> <p>Объект воспринимаемый в виде совокупности характеризующих его свойств. Системы классифицируют по методологически существенным отличиям, имеющимся в конкретных свойствах переменных и их состояний.</p>

Математическое моделирование на уровне исходных систем.

Исследование начинается с выделения объекта из рассматриваемой области и основных свойств из всего множества его разнообразных характеристик. В рамках математической модели образом свойств выступают соответствующие им переменные, множество проявлений которых получены посредством применения определенной исследователем процедуры. Для того, чтобы отслеживать изменение состояния системы, необходимо определить способ, позволяющий отличать одно измерение от другого, таким образом вводится понятие базы. *База* – параметр, значимый с точки зрения установления различных измерений свойства [24]. В качестве ее основных типов выступают время, пространство и группа.

Математическое моделирование исследуемой системы начинается с формализации *системы объекта*:

$$O = \langle \{(a_i, A_i) | i \in N_n\}, \{(b_j, B_j) | j \in N_m\} \rangle, \quad (3)$$

где a_i – свойство; A_i – множество проявлений a_i ;

b_j – база; B_j – множество элементов b_j ;

$N_n = \{1, 2, \dots, n\}$; $N_m = \{1, 2, \dots, m\}$.

Схема взаимосвязи компонентов системы объекта, являющейся одним из основных понятий в системологии, изображена на рисунке 5.

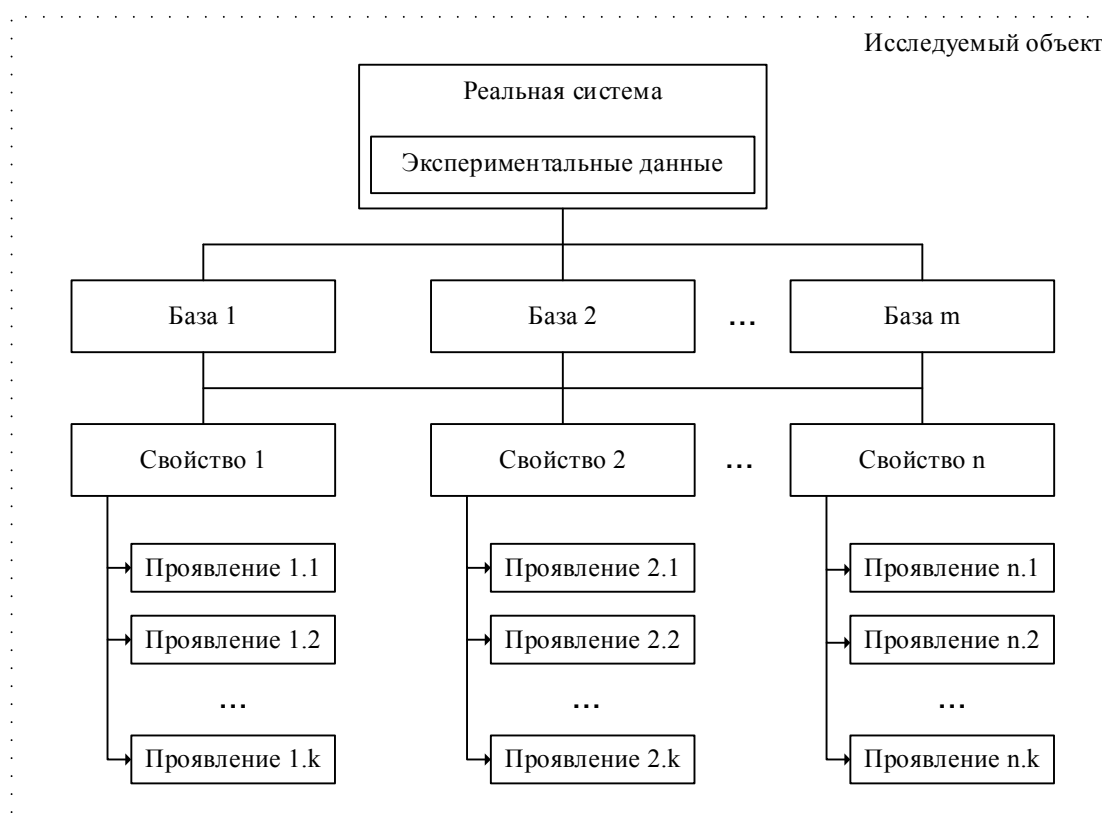


Рисунок 5 – Схематичное представление системы объекта

На множествах состояний и параметров могут быть определены отношения, описывающие фундаментальные математические характеристики элементов системы объекта. Методологически существенные отличия в указанных характеристиках свойств и баз представлены в таблице 2. На нулевом эпистемологическом уровне они фиксируются для соответствующих переменных (параметров), что позволяет представить их в виде математических свойств множеств состояний (множеств значений).

Таблица 2 – Методологические отличия переменных и параметров нулевого эпистемологического уровня

Исходные системы	
Методологическое отличие	Тип характеристики
Упорядоченность	Не упорядочено
	Частично упорядочено
	Линейно упорядочено
Непрерывность	Дискретно
	Непрерывно
Расстояние	Определено
	Не определено

Продолжение таблицы 2

Тип канала наблюдения	Четкий
	Нечеткий
Классификация переменных	Входная
	Выходная

Функция, определяющая операцию, которая ставит в соответствие свойству a_i конкретную переменную \dot{v}_i и множество ее состояний \dot{V}_i , называется *каналом наблюдения* [24]:

$$o_i : A_i \rightarrow \dot{V}_i. \quad (4)$$

Функция перехода от базы b_j к конкретному параметру \dot{w}_j с множеством значений \dot{W}_j :

$$\omega_j : B_j \rightarrow \dot{W}_j. \quad (5)$$

Помимо конкретных переменных и параметров, вводимых при определении конкретной системы и являющихся отображением свойств и баз системы объекта, в рассмотрение должны быть включены *обобщенные переменные и параметры*. Дальнейшим этапом математического моделирования систем в системологии является *абстрагирование конкретных переменных и параметров* – соответствующие им множества состояний изоморфно отображаются на множества состояний их абстрактных (обобщенных) аналогов. Противоположной процедурой является *конкретизация обобщенной переменной v_i с множеством состояний V_i (обобщенного параметра w_j с множеством состояний W_j)*. Конкретизация обобщенной переменной возможна тогда и только тогда, когда функция (6) существует и изоморфна относительно множества математических свойств, определенных на v_i [24].

$$e_i : V_i \rightarrow \dot{V}_i. \quad (6)$$

Конкретизация обобщенного параметра:

$$\varepsilon_j : W_j \rightarrow \dot{W}_j. \quad (7)$$

Так, посредством e_i (ε_j) каждая переменная v_i конкретизируется переменной \dot{v}_i (w_j – параметром \dot{w}_j).

Функции (8) и (9), обратные e_i и ε_j , выражают абстрагирование \dot{v}_i и \dot{w}_j соответственно [24]:

$$e_i^{-1} : \dot{V}_i \rightarrow V_i. \quad (8)$$

$$\varepsilon_j^{-1} : \dot{W}_j \rightarrow W_j. \quad (9)$$

Функции o_i и ω_j производят разбиение множеств A_i и B_j . Элементы каждого полученного блока A_i/o_i и B_j/ω_j (o_i , ω_j определяют четкие каналы наблюдения) с позиции процедуры наблюдения неотличимы друг от друга (эквивалентны). Дальнейшее математическое моделирование на данном эпистемологическом уровне требует формирования общей представляющей системы. Таким образом, путем двух последовательных абстрагирований производится переход от системы объекта O к конкретной представляющей системе (КПС) \dot{I} :

$$\dot{I} = \langle \{(\dot{v}_i, \dot{V}_i) | i \in N_n\}, \{(\dot{w}_j, \dot{W}_j) | j \in N_m\} \rangle, \quad (10)$$

а от нее – к общей представляющей системе (ОПС) I :

$$I = \langle \{(v_i, V_i) | i \in N_n\}, \{(w_j, W_j) | j \in N_m\} \rangle. \quad (11)$$

В системологии связь систем O и \dot{I} определяется через полный канал наблюдения, включающий используемые каналы наблюдения свойств и баз:

$$\mathcal{O} = \langle \{(A_i, \dot{V}_i, o_i) | i \in N_n\}, \{(B_j, \dot{W}_j, \omega_j) | j \in N_m\} \rangle. \quad (12)$$

Канал конкретизации и абстрагирования выражает связь \dot{I} с I и включает соответствующие отображения переменных (параметров):

$$\mathcal{E} = \langle \{(\dot{V}_i, V_i, e_i) | i \in N_n\}, \{(\dot{W}_j, W_j, \varepsilon_j) | j \in N_m\} \rangle. \quad (13)$$

Исходная система S_s обеспечивает связи с реальным миром через \mathcal{O} и O и характеризуется пятеркой:

$$S_s = (O, I, \dot{I}, \mathcal{O}, \mathcal{E}). \quad (14)$$

Семантические аспекты определяются через элементы $I, O, \mathcal{O}, \mathcal{E}$ заданной исходной системы, что делает возможным интерпретацию абстрактных данных, заданных исследователем или выводимых самой системой (рисунок 6). В системологии решение системных задач требует, чтобы данные были определены в виде обобщенных переменных и параметров, поэтому дальнейшее математическое моделирование на вышестоящих эпистемологических уровнях связано только с системой I , так, на первом уровне иерархии, называемом системы данных, модель системы представляет собой пару:

$$D = (I, d), \quad (15)$$

где d – функция, ставящая в соответствие каждому значению полного параметра из множества W одно полное состояние переменных из множества V :

$$d : W \rightarrow V, \quad (16)$$

где $W = \prod_{j=1}^m W_j$ – декартово произведение множеств обобщенных значений

параметров системы;

$V = \prod_{i=1}^n V_i$ – декартово произведение множеств обобщенных состояний

переменных системы.

Множество переменных v_i обозначим через $V' = \{v_i \mid i \in N_n\}$, множество параметров w_j – через $W' = \{w_j \mid j \in N_m\}$, тогда модель ОПС примет вид:

$$I = \langle V', V, W', W \rangle. \quad (17)$$

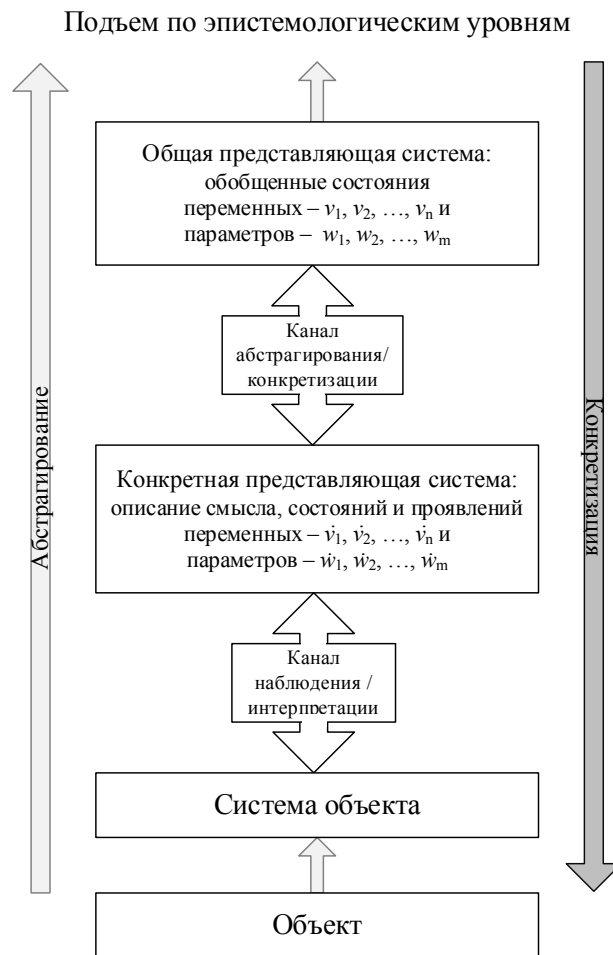


Рисунок 6 – Структурная схема исходной системы

Система первого уровня может быть определена как минимум тремя способами: во-первых, получена в результате измерений или наблюдений; во-вторых, выведена из системы более высокого эпистемологического уровня; в-третьих, определена самим исследователем. Представленная соответствующим образом система является основой для решения фундаментальных задач системологии – задач реконструкции и идентификации.

Если в конкретных исследованиях необходимо сохранить и смысловое описание переменных (параметров), то в сочетании с d включают систему S_S , тем самым получая систему данных с семантикой: $D_S = (S_S, d)$. Системы данных в зависимости от методологических отличий могут быть направленными и нейтральными, с семантикой и без нее.

Для перехода на основе систем данных к вышестоящему эпистемологическому уровню *порождающих систем* вводятся понятия маски

порождения, порождающей функции поведения, системы с поведением порождающей, определение которых отличается в зависимости от типа исходной системы (нейтральная, направленная с наличием информации о входных переменных, направленная с отсутствием информации о входных переменных). Полученная в результате перехода модель системы в задаче реконструкции выступает в качестве полной системы, а значит эталонной (оптимальной) реконструкции. В основе порождающих систем лежат системы с поведением.

Системы с поведением.

Термин «поведение» определяет инвариантное на множестве W' ограничение, общее для переменных, полученных посредством применения параметрических правил сдвига на так называемые базовые переменные множества V' из системы I (указанное ограничение может быть использовано для порождения их состояний). Параметрическое правило сдвига определяется функцией:

$$r_j : W \rightarrow W, \quad (18)$$

которая каждому значению параметра из W ставит в однозначное соответствие другое значение из W .

При упорядоченном параметрическом множестве, состояния переменных могут определяться на основе выбранного соседства. Такое соседство в системологии называется маской M . Так, если элементы полностью упорядоченного параметрического множества T представляют собой последовательные целые положительные числа, то правило сдвига задается уравнением: $r_j(t) = t + \rho_j, t \in T$, где $\rho_j = const$ (если $\rho_j = 0$, то $r_j(t)$ представляет собой тождественное правило сдвига). Результатом применения набора \mathcal{R} таких правил сдвига является множество *выборочных переменных* $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, $k \in N_q$. Выборочные переменные определяются *маской*, то есть отношением $M \subseteq V' \times \mathcal{R}$, таким что $(\forall (v_i, r_j) \in M) \rightarrow s_{k,w_j}$, где $v_i \in V'$, $r_j \in \mathcal{R}$, s_{k,w_j} – состояние

выборочной переменной s_k при значении параметра $w_j \in W'$. Полное множество состояний выборочных переменных $C = \prod_{k=1}^q S_k$.

Параметрически инвариантная функция $f_B : C \rightarrow \{0, 1\}$, определяющая реально встречающиеся состояния s , называется *выбирающей функцией поведения* [24]. Она формируется посредством использования маски M , основанной на переменных и параметрах системы I .

Система с поведением определяется тройкой элементов:

$$F_B = (I, M, f_B). \quad (19)$$

Система F_B не включает описание того, как из параметрически инвариантного ограничения могут порождаться данные. Для порождения данных множество выборочных переменных делится на два подмножества:

- подмножество порождающих переменных \bar{g} , множество состояний $\bar{g} \in \bar{\mathbf{G}}$ которых определяется из ограничения $M_{\bar{g}}$, служащего начальным условием для генерации данных;
- подмножество порождаемых переменных g , состояния $g \in \mathbf{G}$ которых определяется на основе состояний из $\bar{\mathbf{G}}$.

Система с поведением порождающая определяется тройкой:

$$F_{GB} = (I, M_G, f_{GB}), \quad (20)$$

где $M_G = \langle M, M_g, M_{\bar{g}} \rangle$ – маска порождения – маска и ее разбиение на порождаемую и порождающую подмаски (для направленных систем $M_G = \langle M, M_e, M_{\bar{e}} \rangle$ включает M_e – подмаску, определенную на входных переменных $e \in E, E \subset V'$, при этом $M_{\bar{e}} = M_g \cup M_{\bar{g}}$);

$f_{GB} : \bar{\mathbf{G}} \rightarrow \mathbf{G}$ – выражает метод определения состояний порождаемых переменных $g \in \mathbf{G}$ из состояний порождающих переменных $\bar{g} \in \bar{\mathbf{G}}$, то есть $g = f(\bar{g})$ (для направленных систем $f_{GB} : \mathbf{E} \times \bar{\mathbf{G}} \rightarrow \mathbf{G}$).

Переход к системам с поведением включает набор предъявляемых к ним требований:

а) выбор подмножества систем из множества всевозможных систем с поведением определен некоторыми начальными условиями, заданными по умолчанию или определяемые пользователем;

б) выбор систем с поведением в пользу тех, для которых минимально несоответствие полученных в них состояний эмпирическим данным (минимизирована несогласованность переменных системы данных и системы с поведением);

в) степень недетерминизма системы с поведением должна быть минимальна (минимизирована степень неопределенности порождения посредством масок, входящих в системы выбранного подмножества);

г) сложность системы с поведением должна быть минимальна (требование простоты);

д) приоритет требований (б), (в), (г).

Выполнение указанных требований сводится к задаче поиска содержательных подмасок.

Все содержательные подмаски наибольшей допустимой маски M образуют ограниченное множество систем с поведением. Подмаска считается содержательной, если она выполняет следующие условия:

а) содержит хотя бы по одному элементу из каждой подмаски $M_i = \{(\alpha, \beta) \mid (\alpha, \beta) \in M, \alpha = v_i\}$;

б) содержит хотя бы один элемент с правилом сдвига $t + \max(\rho)$, при перемещении маски по матрице данных в направлении возрастания параметра, или $t + \min(\rho)$, при перемещении маски в направлении убывания параметра.

Число возможных подмасок:

$$\hat{N} = (2^{\Delta M} - 1)^n - (2^{\Delta M - 1} - 1)^n, \quad (21)$$

где n – число базовых переменных; $\Delta M = 1 + \max(\rho) - \min(\rho)$ – глубина маски M .

Если параметрическое множество неупорядоченно, то применима только маска с $\Delta M = 1$, которая называется маской без памяти.

Применение маски с большой глубиной нежелательно, так как от нее зависит количество элементов, составляющих начальное условие, определение которого иногда бывает затруднено. Важно также учитывать, что стремительный рост числа содержательных подмасок связан не только с увеличением количества элементов множества V' , но и с увеличением глубины маски. Кроме того, при выборке данных с помощью маски, число неполных выборок будет равно $2(\Delta M - 1)$, то есть увеличение глубины маски указывает еще и на рост потери функцией поведения эмпирической основы. Формирование порождающих систем и их применение на следующем эпистемологическом уровне требует, чтобы они наилучшим образом представляли набор эмпирических данных, следовательно, выбор должен быть осуществлен в пользу систем, которые имеют наименьшую порождающую нечеткость. Для выбора оптимальных порождающих систем с поведением сравнение по порождающей нечеткости должно осуществляться для всех полученных систем.

На втором эпистемологическом уровне также выделяют параметрически инвариантные отличия переменных (таблица 3).

Таблица 3 – Методологические отличия переменных второго эпистемологического уровня.

Порождающие системы	
Методологическое отличие	Тип характеристики
Упорядоченность	Не упорядочено
	Частично упорядочено
	Линейно упорядочено
Тип маски	С памятью
	Без памяти
Генерируемые данные	Точные (детерминированные)
	Нечеткие (стохастические):
	- вероятностные; - возможностные
Тип канала наблюдения	Четкий
	Нечеткий
Классификация переменных	Входная
	Выходная

Структурированные системы.

Существует несколько причин введения структурированных систем. Одной из них является сложность в осуществлении измерения всех включенных в исследование свойств системы одновременно (особенно, если в качестве параметра выступает время). Еще одна причина – сложность систем, затрудняющая исследование ввиду того, что исследователю тяжело охватить систему целиком, определить пределы рассматриваемой задачи. Для первого случая структурированные системы позволяют обрабатывать данные, собранные на подмножествах переменных. Для второго – их применение делает систему более обозримой. Более того, переход к структурированным системам позволяет получить новую информацию о системах предыдущих эпистемологических уровней [119].

Уровень структурированных систем оперирует такими базовыми понятиями как подсистема, структурированная система, полная система. Система является подсистемой, если она состоит из переменных, полностью входящих в другую систему. Структурированная система представляет собой объединение нескольких систем, стоящих на одном эпистемологическом уровне и взаимодействующих между собой. При этом формируется *полная система*, которая включает все переменные из элементов структурированной системы и неразрывно с ней связана. В таком контексте элементы структурированной системы выступают подсистемами полной системы, а сама полная система – их суперсистемой. Уточнение структуры может быть рассмотрено на примере элементарной структурированной системы корректировки ошибок (рисунок 7а), поведение последовательного сумматора в которой (рисунок 7б) описывают уравнения:

$$z_t = x_t + y_t - c_{t-1} \pmod{2}, \quad (22)$$

$$c_t = \frac{x_t + y_t + c_{t-1} - z_t}{2}, \quad (23)$$

где x_t, y_t – состояния входных переменных в момент t ; z_t – состояние выходной переменной (суммарный бит) в момент t ; c_t и c_{t-1} – состояние внутренней

переменной (цифра переноса) в момент t и $t-1$. Дальнейшее уточнение дает элемент (рисунок 7в), реализующий уравнение (23).

При этом возможно укрупнение в системе, представляющей собой арифметическое устройство, а также ее укрупнение в системе центрального процессора и т.д.

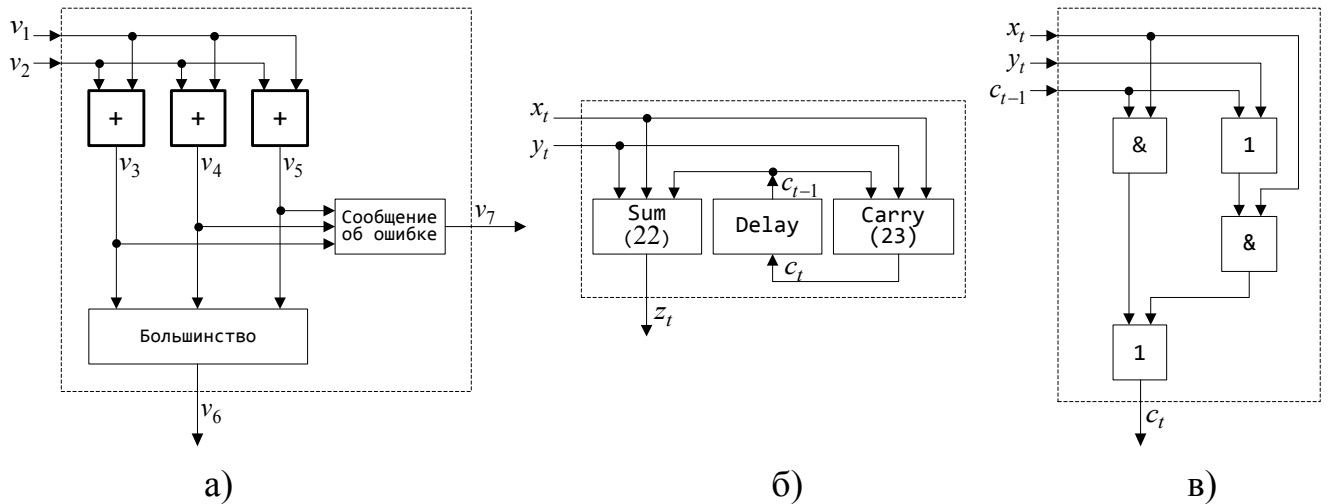


Рисунок 7 – Уточнение системы

Таким образом, указанный статус систем не абсолютен, так, система на одном этапе исследования выступает в качестве элемента структурированной системы, а на другом – полной системой, из подсистем которой образуется структурированная система. Такая двойственность позволяет полную систему представить в виде иерархии структурированных систем, то есть как структурированную систему, элементами которой являются структурированные системы и так далее, вплоть до систем, с элементами, представленными отдельными переменными. При этом должны выполняться условия избыточности и покрытия. *Условие избыточности* гласит: в структурированной системе не должно быть элементов, являющихся подсистемами других ее элементов. Таким образом, не допускается перемешивание уровней отдельных структурированных систем и обеспечивается их иерархическая упорядоченность. Выполнение *условия покрытия* заключается в том, что исключаются наборы подсистем, не содержащие все переменные полной системы, что обеспечивает выполнение требования охвата информации обо всех

переменных полной системы в реконструктивной гипотезе и делает реконструкцию логически возможной.

Для исследования систем и решения системных задач требуется решить две основные взаимодополняющие задачи системологии:

1. *Задача идентификации* предполагает определение степени соответствия некоторой полной системе ее представления через совокупность подсистем. Очень редко удается со стопроцентной точностью идентифицировать полную систему, поэтому определяется реконструктивное семейство, в которое она входит. Если реконструктивное семейство пусто, значит, информация о полной системе из заданных подсистем будет противоречива и не согласована. Выделяют два вида несогласованности: локальная и глобальная. Локальная несогласованность относится к общим переменным, входящим в различные элементы структурированной системы. Выражается она в несовпадении характеристик этих переменных (например, значения вероятностной функции поведения в элементах разнятся). Структурированная система глобально не согласована, если все пары ее элементов локально согласованы, в то время как реконструктивное семейство пусто. Локальная несогласованность свидетельствует о том, что элементы структурированной системы не соответствуют действительным элементам или составлены из различных неполных, неточных наборов данных. Выбор системы из реконструктивного семейства основан на эпистемологическом принципе, гласящем, что полученная полная система опирается на всю информацию, содержащуюся в структурированной системе, при этом сторонней информации не используется. Оценка информации производится, исходя в том числе и из принципа минимума нечеткости, которую она вносит в выводимую полную систему. Применение этой оценки требует ее математической формализации.

2. *Задача реконструкции* связана со сложностью рассмотрения системы с большим количеством переменных и управления ею, что особенно актуально для систем уже находящихся в критическом состоянии. Еще одним аспектом решения задачи реконструкции является экономия оперативной памяти

компьютера, уменьшение вычислительного времени. Представление системы набором подсистем дает исследователю данные, не содержащиеся в соответствующей полной системе. Так, из сочетаний подсистем может быть получена информация о причинно-следственных связях, силе зависимостей между переменными и о значениях конкретных переменных. Упрощение системы в ходе решения задачи реконструкции должно сопровождаться минимизацией потери информации. Для оценки потери информации также используется принцип минимума нечеткости (для вероятностной меры в качестве такой оценки выступает энтропия, для возможностной – U -нечеткость). Количество информации должно быть вычислено для каждой реконструктивной гипотезы полной системы, для чего необходимо восстановить гипотетическую полную систему и сравнить ее с реальной полной системой. Максимально упрощенная система должна быть близка к реальной системе при значении информационного расстояния на требуемом уровне. Два этих параметра находятся в прямом противоречии, то есть чем детальнее разбиение системы на подсистемы, тем больше информационное расстояние. Окончательное решение по наиболее точному восстановлению реальной полной системы принимается с учетом этих двух параметров. Клир указывает на сложность решения задачи реконструкции в вычислительном отношении.

Решение задач, связанных с математическим моделированием и исследованием систем системологическими методами, невозможно без подробного рассмотрения и решения основных задач системологии. Рассмотрение *задачи идентификации* начинается с анализа двух подзадач, содержащихся в ней. Первая связана с нахождением множества всех полных систем, представленных структурированными системами. Вторая – это задача выбора из реконструктивного семейства такой полной системы, которая является лучшей гипотезой относительно реальной полной системы. Выбор одной единственной системы из указанного семейства основан на двух подходах:

1. Поиск *несмещенной реконструкции* – точной реконструктивной гипотезы относительно полной системы.

2. Поиск *реконструкции с наименьшим риском* – гипотезы относительно полной системы, для которой наибольшая возможная ошибка минимальна.

Следовательно, *реконструктивная гипотеза* представлена структурированной системой, которая сравнима с полной системой и для набора подсистем которой выполняется требование неизбыточности и условие покрытия.

Несмещенная реконструкция представляет собой реконструктивную гипотезу, которая выступает в качестве предполагаемой полной системы. Потеря информации при реконструкции полной системы определяется посредством вычисления шенноновской энтропии или U -нечеткости для вероятностных или возможностной мер соответственно. Джорджу Клиру удалось разработать вычислительные процедуры, которые заменяют более сложные вычисления при поиске несмещенной реконструкции и называются процедурами соединения вероятностными и возможностными соответственно. Несмещенная реконструкция, если она существует, находится с помощью базовой процедуры соединения, которая объединяет элементы, входящие в заданную структурированную систему, и их функции поведения.

Описание базовой процедуры соединения: Задана структурированная система с поведением SF_B , пусть соединение осуществляется для двух ее подсистем, состоящих из множеств выборочных переменных 1S и 2S , с функциями поведения 1f и 2f соответственно. Выполнение объединения подсистем требует приведения области определения функций 1f и 2f таким образом, что на множестве выборочных переменных рассматриваемых подсистем формируется три подмножества:

B – множество выборочных переменных, общих для обеих подсистем, $B = {}^1S \cap {}^2S$;

A – множество выборочных переменных, входящих только в первую подсистему, $A = {}^1S \setminus ({}^1S \cap {}^2S)$, ${}^1f : A \times B \rightarrow [0, 1]$;

C – множество выборочных переменных, входящих только во вторую подсистему, $C = {}^2S \setminus ({}^1S \cap {}^2S)$, ${}^2f : \mathbf{B} \times C \rightarrow [0, 1]$.

Обозначая отдельные состояния выборочных переменных через $a \in A, b \in \mathbf{B}, c \in C$, результат процедуры базового соединения (операции соединения) для вероятностной функции распределения имеет вид:

$${}^1f * {}^2f = \begin{cases} {}^1f(a, b) \cdot {}^2f(c | b), & \text{если } A \neq \emptyset \text{ и } \mathbf{B} \neq \emptyset, \\ {}^1f(b) \cdot {}^2f(c | b), & \text{если } A = \emptyset, \\ {}^1f(a) \cdot {}^2f(c), & \text{если } \mathbf{B} = \emptyset. \end{cases} \quad (24)$$

Для возможностной функции распределения:

$${}^1f * {}^2f = \begin{cases} \min({}^1f(a, b), {}^2f(b, c)), & \text{если } A \neq \emptyset \text{ и } \mathbf{B} \neq \emptyset, \\ \min({}^1f(b), {}^2f(b, c)), & \text{если } A = \emptyset, \\ \min({}^1f(a), {}^2f(c)), & \text{если } \mathbf{B} = \emptyset. \end{cases} \quad (25)$$

Таким образом:

$${}^1f * {}^2f : A \times \mathbf{B} \times C \rightarrow [0, 1]. \quad (26)$$

Операция соединения выполняется для пар элементов структурированной системы SF_B , которые в результате образуют новую систему (реконструкцию), при этом одним из начальных условий является локальная согласованность SF_B . В зависимости от вида и состава подсистем операция бывает вероятностной или возможностной, обычной ($A \neq \emptyset$ и $\mathbf{B} \neq \emptyset$) или вырожденной ($A = \emptyset$ или $\mathbf{B} = \emptyset$).

Чтобы выполнить базовую процедуру соединения – произвести соединение ${}^k f$ для всех $k \in N_q$, необходимо осуществить следующие шаги:

- 1) задать $k = 2$ и $f = {}^1f$;
- 2) произвести группировку аргументов a, b, c функций ${}^k f$ и f , выполнить операцию соединения ${}^k f * f \rightarrow f$;
- 3) если $k < q$, то $k + 1 \rightarrow k$ и перейти на шаг 2;
- 4) конец.

Если в результате применения базовой процедуры соединения выполнено условие для проекций: $[f \downarrow^k S] = {}^k f$ для всех $k \in N_q$, следовательно, найдена *точная несмещенная реконструкция*. В противном случае функция f противоречит заданной структурированной системе и для дальнейшего поиска несмещенной реконструкции необходимо ее уточнение с помощью итеративной процедуры соединения, которая формулируется следующим образом: Задана система SF_B с функциями ${}^j f (j \in N_{0,q-1})$ и функция f , полученная в результате применения базовой процедуры соединения к SF_B . Установить с точностью до $\Delta_S \in [0, 1]$ значения функции поведения несмещенной реконструкции. Для осуществления поиска необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) задать $j = 0$, $i = 1$ и $f_0 = f$;
- 2) произвести разбиение аргументов ${}^j f$ и f_{i-1} , выполнить операцию соединения ${}^j f * f_{i-1} \rightarrow f_i$ для вырожденного случая;
- 3) если $i \neq 0 \pmod{q}$, то $i + 1 \rightarrow i$, $j + 1 \pmod{q} \rightarrow j$, перейти на шаг 2;
- 4) если $|f_i(c) - f_{i-q}(c)| > \Delta_S$ для некоторого $c \in C$, то $i + 1 \rightarrow i$, $j + 1 \pmod{q} \rightarrow j$, и перейти на шаг 2;
- 5) конец.

Если итеративная процедура соединения в результате дает $\sum_{c \in C} f_i(c) = 1$, то

$\forall c \in C, (f_{SF_B}(c) - \Delta_S) \leq f_i(c) \leq (f_{SF_B}(c) + \Delta_S)$, иначе SF_B не согласована глобально, а, следовательно, бессодержательна и для нее осмысленной полной системы не существует.

Задача реконструкции.

Формулируется задача следующим образом. Дана система, рассматриваемая как полная система. Найти наборы подсистем данной системы, подходящие для ее реконструкции с заданной точностью, при этом реконструкция должна производиться только по содержащейся в этих подсистемах информации.

Указанное положение позволяет осуществить сравнительный анализ результатов моделирования сложных систем на основе иерархических моделей [40].

Решение задачи идентификации дает обоснованную модель неизвестной полной системы, построенную на базе заданной структурированной системы. При этом истинная полная система неизвестна, поэтому определить близость к ней полученной гипотетической системы не представляется возможным. Напротив, решение задачи реконструкции позволяет оценить реконструктивные возможности гипотезы относительно заданной полной системы. Полная система, набор всех ее реконструктивных гипотез с отношением уточнения, образующим решетку, называется *решеткой уточнения*. Решетка уточнения может быть получена выполнением одной универсальной процедуры уточнения/укрупнения для любой указанной реконструктивной гипотезы. Реконструктивные гипотезы формируются из полной системы в несколько шагов, подразделяются на уровни уточнения и могут быть полностью описаны:

- 1) семейством подмножеств переменных, которые входят в полную систему;
- 2) соответствующими этим подмножествам функциями поведения.

Если из описания исключить (2), то (1) позволяет установить класс инвариантности реконструктивных гипотез, отличимых между собой функциями поведения. Такой класс инвариантности называется *структурой*. Так как отдельная реконструктивная гипотеза представляет собой структурированную систему, то структура выступает в роли характерного для нее свойства, инвариантного к изменению функций поведения ее элементов.

Для множества переменных $\bigcup_{k \in N_q} {}^k S$ множество структур, представляющих все реконструктивные гипотезы относительно заданной полной системы, определенной на $\bigcup_{k \in N_q} {}^k S$, состоит из семейств подмножеств данного множества переменных, удовлетворяющих условиям неизбыточности и покрытия. Обозначим все множества переменных одной мощности n общим множеством структур G_n , определенным на множестве N_n натуральных чисел. Так,

$\forall n \in N, (G_n = \{G_i \mid G_i \subset P(N_n), G_i \text{ – удовлетворяет условиям избыточности и покрытия}\}, \text{ где } P(N_n) \text{ – множество всех подмножеств множества } N_n)$. Здесь G_i представляют элементы G_n , то есть общие структуры, задействованные в решении задачи реконструкции; i – индекс идентификации структур в составе G_n и $i \in N_{|G_n|}$. Структуры из множеств G_n называются G -структурами. Подобное описание позволяет исследовать реконструктивные гипотезы в виде абстрактных структур, сравнение и интерпретация которых относительно полной системой, состоящей из n переменных, дает конкретные гипотезы.

Решение задачи реконструкции требует эффективных вычислительных процедур представления и оценки реконструктивных гипотез. При этом в системологии отмечается сложность их создания, в том числе из-за быстрого роста количества структур с увеличением числа переменных. Кроме того, такие процедуры должны включать упорядочение и классификацию структур.

Упорядочение структур формулируется следующим образом: для двух структур $G_i \in G_n$ и $G_j \in G_n$, G_i является уточнением G_j , тогда и только тогда, когда $\forall x \in G_i \exists y \in G_j : x \subseteq y$; при этом запись $G_i \leq G_j$ указывает, что G_i является уточнением G_j , а G_j – укрупнение G_i .

G_i является непосредственным уточнением G_j тогда и только тогда, когда $\neg \exists G_k \in G_n : G_i \leq G_k, G_k \leq G_j$. Для заданной $G_i \in G_n$ структурное соседство определяется множеством всех непосредственных уточнений и непосредственных укрупнений G_i в G_n . Рассмотренные структуры образуют *решетку уточнения G -структур*. Решетка уточнения (или исследуемая часть решетки) формируется в результате итерационного выполнения алгоритма процедуры, порождающей все непосредственные уточнения для структуры из решетки. Такой процедурой является *уточняющая процедура для G -структур (RG-процедура)* [24], которую можно изложить в следующем виде:

Заданы $G_i = \{^k S \mid k \in N_q\} \in G_n$. Требуется определить все непосредственные уточнения заданных G -структур, для этого необходимо:

- 1) установить $k = 0$;
- 2) если $k < q$, то $k = k + 1$, иначе перейти на шаг 5;
- 3) если $|{}^k S| \geq 2$, то $(G_i - \{^k S\}) \cup X \rightarrow R$, где $X = \{x | x \subset {}^k S, |x| = |{}^k S| - 1\}$; иначе перейти на шаг 2;
- 4) $R \rightarrow Q_R$, где Q_R – избыточный аналог R , записать Q_R в качестве непосредственного уточнения G_i , перейти на шаг 2;
- 5) конец.

Выполнение неравенства $|{}^k S| \geq 2$ гарантирует, что порождаемые структуры будут удовлетворять условию покрытия. Ввиду того, что на шаге (3) производится минимальное изменение структуры (единственного элемента из G_i), то генерируются непосредственные уточнения G_i . Четвертый шаг алгоритма обеспечивает выполнение условия избыточности.

При решении задачи реконструкции выполняется три набора процедур:

- процедуры генерации реконструктивных гипотез;
- процедуры оценки и сравнения сгенерированных гипотез относительно целей реконструкции;
- процедуры принятия решения о: включении гипотезы во множество решений, дальнейшей генерации на ее основе реконструктивных гипотез; продолжении или завершении процесса решения.

На рисунке 8 показана взаимосвязь указанных наборов процедур в рамках единого процесса решения.

Системологический подход к процессу принятия решений дает ряд преимуществ:

- возможность сопоставить и оценить противоречивые (неоднородные) системные критерии;
- возможность ориентироваться в различных предметных областях и решать системные задачи, возникающие в них;
- возможность решения слабоформализованных задач;
- решение иных задач, выделенных в работе [113].



Рисунок 8 – Общая схема процесса решения задачи реконструкции

Для решения задач исследования в качестве методологической базы выбран математический аппарат структурированных систем, применение которого требует поэтапного формирования систем предыдущих эпистемологических уровней (исходные системы, системы данных, порождающие системы). Выбор методов этого класса обусловлен тем, что изучение и математическое моделирование неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой полностью входит в область задач указанных методов, кроме того, так как они лежат на третьем эпистемологическом уровне и подразумевают реализацию моделей систем нижестоящих уровней иерархии, то их применение позволит решить ряд системных задач, способствующих получению дополнительной информации об исследуемой системе.

1.3 Выводы

В настоящее время исследование слабоформализованных систем и принятие оптимальных решений на его основе осуществляется эвристическими, формализованными и статистическими методами [120, 121]. За десятки лет применения они хорошо себя зарекомендовали, однако осуществляемый с их помощью анализ неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой зачастую затруднен или невозможен. В рамках задачи выбора методов математического моделирования и принятия решений, соответствующих области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой, и для ее решения проведено исследование возможности применения указанных методов, которое показало, что:

1. Применение эвристических методов широко практикуется, особенно в области слабоструктурированных задач, их преимуществом является возможность оперативного использования. Вместе с тем они не гарантируют получение оптимального варианта решения, а выработанное посредством их использования решение, как правило, относится лишь к множеству допустимых. Такое решение требует основательной проверки и, что немаловажно, правильной интерпретации, так как объект решения в данной группе методов специально не исследуется [122]. Кроме того, они не дают четких способов решения проблемы, их неформализованность затрудняет применение компьютерной обработки. Однако эвристические методы до сих пор лежат в основе принятия решений участниками рынка в условиях совершенной конкуренции, что является одной из главных причин повторяющихся кризисов.

2. Формализованные методы, такие как морфологический, комбинаторный, методы логического поиска и метод «букета проблем» базируются на фактографической информации [123]. Они результативны, отличаются простотой применения, наличием разработанных алгоритмов, способностью определять динамику развития ситуации. Однако применительно к неоднородным слабоформализованным системам с динамической структурой не лишены ряда существенных недостатков: во-первых, их применение возможно

только при наличии предыстории развития исследуемого процесса; во-вторых, они не в состоянии учесть скачкообразные изменения системных параметров. Так же, как и эвристические, эти методы являются субъективными – они основаны на знаниях и опыте исследователя [124], а разработанная формализованная модель при дальнейшем развитии объекта исследования устаревает и, в случае поступления новых данных, требуется начинать исследование заново. Метод анализа иерархий давно и успешно используется в области принятия решений, в частности в реализациях СППР. Иерархическое представление исследуемой системы (задачи) [125], формат шкалы Саати [126], возможность оценки критериев различной природы [127] учитывают специфику работы лица, принимающего решение, однако в ряде исследований отмечены существенные недостатки метода [46, 128, 129, 130].

3. Применение статистических методов исследования слабоформализованных систем наиболее распространено, но не лишено исследовательских ошибок на этапах обработки и анализа данных, выбора адекватных методов построения качественных статистических моделей. Связано это, прежде всего, с тем, что каждый из методов базируется на ряде допущений и системе ограничений, нарушение которых приводит к некорректному использованию метода и к ошибочной интерпретации результатов. В исследовании процесса функционирования слабоформализованных систем востребованы методы временных рядов [131] и факторный анализ [132]. Проверка предпосылок и допущений статистических методов предполагает решение большого комплекса задач, что требует немалых временных затрат [133], даже несмотря на то, что статистические методы компьютеризированы и имеют успешную программную реализацию (программный пакет STATISTICA и другие). Кроме того, до сих пор остается открытой проблема выбора методов, позволяющих построить качественные модели, отражающие зависимости между разнородными данными, которые учитывали бы динамическую структуру указанного класса систем.

4. Исследование методов линейного программирования показало наличие таких ограничений, как линейность критерия оптимальности и ограничений, сложность разработки приемлемой модели, которая учитывала бы многочисленные нюансы, возникающие в большей части практических приложений (нелинейность задач приводит к некорректным моделям) и другие [134]. При моделировании неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой методами математического программирования наряду с достоинствами в нелинейном и динамическом программировании возникают некоторые трудности [135, 136, 137]. Так, в динамическом программировании не выработано единого метода решения: для каждой конкретной задачи осуществляется подбор методики решения, таким образом, при слабой формализации задачи решение носит трудоемкий характер.

Программные реализации исследованных методов внедряются в ЭС, СППР и инструментальные средства, каждая из которых имеют определенную специфику. ЭС направлены на решение задач, возникающих в конкретной предметной области [138, 139], и не могут быть применены для решения близких, но не предусмотренных при их создании, задач [140, 141]. Изменение постановки задачи, области исследования, которое не было отображено в базе знаний конкретной реализации ЭС, приводит к необходимости создания новой или выбора подходящей ЭС [142]. Модификация базы знаний и переход на другие типы задач приводят к полной переработке блока извлечения, сбора данных, принятия решений, то есть к созданию новой ЭС [143]. В свою очередь, в качестве математической основы СППР выступают статистические методы [144-147], нейронные сети, генетические алгоритмы [148, 140, 141], метод анализа иерархий [89].

Несмотря на существенные отличия, в основе большинства методов принятия решений лежат системный подход и системная парадигма. Представление объекта исследования в виде системы (набора систем) позволяет его всесторонне изучить в развитии, в совокупности взаимосвязей элементов [77]. Сложности в применении системного подхода возникают при неоднозначности

выбора существенных для дальнейшего исследования элементов систем [1]. Рассмотренные выше методы предназначены для преодоления указанных сложностей, однако конкретные из них подходят для конкретной специфики (области принятия решений). Взаимно противоречивые требования универсальности процедур принятия решений и учета возможностей лица, принимающего решение, приводят к тому, что ни один из методов в полной мере не обеспечивает одновременного выполнения этих требований. По этой причине не уменьшается интерес исследователей к разработке методов принятия решений [131]. В работе [149] отмечается неэффективность традиционных методов математического моделирования для исследования сложных социально-экономических систем и прогнозирования их состояния. Подчеркивается потребность в новых методах исследования и принятия решений с опорой на системологические имитационные модели, позволяющие концептуализировать задачу и провести ее подробное математическое моделирование [150]. Возрастает актуальность разработки единого подхода к разнообразным системным исследованиям в современном научном познании [151], а для решения слабоструктурированных задач – разработки нового подхода [152]. Все больше становится понятно, что элементы многокритериальных систем требуют принципиально новых методов оценки. Таким образом, проведенное исследование позволило сделать вывод о необходимости внедрения системологической методологии, включая численные методы и алгоритмы решения основополагающих системных задач, в области научно-исследовательской и практической деятельности.

Системология Джорджа Клира построена на методологических принципах, позволяющих проводить моделирование систем из различных предметных областей в единой математической терминологии [153]. Численные методы системологии Клира позволяют адекватно представлять системы различной сложности [154] и решать связанные с ними задачи, соответствуют основополагающим принципам системного анализа – решение сводится к анализу (задача реконструкции) и синтезу (задача идентификации) систем. Например,

структурный подход к сложным процессам преобразования ресурсов позволяет их организовать в иерархию подпроцессов [68]. Научный интерес к системологическим методам связан с тем, что системология занимается моделированием систем, исследованием скрытых взаимосвязей между их элементами, созданием стабильно функционирующих систем на основе синтеза; методы системологии являются междисциплинарными и ориентированы на автоматизацию решения системных задач в независимости от предметной области, в которой они возникают.

Глава 2. Исследование и разработка математического обеспечения инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем

Инструментарий поддержки принятия решений, особенно управленческих, необходим исследователю; применение математических методов, ориентированных на его реализацию посредством компьютерных технологий, хорошо развито и имеет широкие перспективы в этом направлении. Математическое моделирование методами системологии позволяет осуществить обработку данных, анализ и прогнозирование состояния объекта исследования в инструментальных средствах для поддержки принятия решений; математическая формулировка слабоформализованной системы дает возможность получить информацию, не содержащуюся в исходной формулировке, но необходимую для принятия оптимальных решений посредством алгоритмов, заложенных в дальнейшем в программные реализации. Таким образом, важнейшим блоком инструментальных средств для поддержки принятия решений является блок математического моделирования (включая модули подготовки данных: извлечения, загрузки и обработки), основанный на конкретных математических моделях и методах принятия решений, либо их сочетании. Для формирования математического блока необходимо разработать общие для различных систем математические модели, которые будут заложены в инструментальные средства, и провести исследование возможности применения составляющих его математических методов к рассматриваемому классу систем.

2.1 Построение математических моделей эпистемологических уровней порождающих и структурированных систем

Исследование систем с применением математических методов системологии включает следующие основные этапы:

- 1) Формирование на базе объекта исследования исходной системы;
- 2) Формирование системы данных (как правило, в виде массива);

- 3) Обработка данных для выявления характерных свойств систем, инвариантных относительно параметров;
- 4) Интерпретация полученных свойств систем;
- 5) Формулирование итогов проведенного исследования (выводы).

Этап обработки данных производится на втором эпистемологическом уровне – уровне порождающих систем, на котором, так же, как и на других уровнях, определены соответствующие методологические отличия (таблица 3). Задачу нахождения оптимальных порождающих систем можно сформулировать следующим образом: задана система данных, требуется найти параметрически инвариантную характеристику системы, наилучшим образом представляющую отношение между ее переменными, для обобщения, генерации данных и прогнозирования состояния системы.

Порождающая система в общем виде должна включать способ перехода от состояний переменных к значениям функции, которая определяет параметрически инвариантные на множестве $V' = \{v_i | i \in N_n\}$ ограничения. Следовательно, математическую модель порождающей системы определим следующим образом:

$$GS = \langle \{(v_i, V_i) | i \in N_n\}, \varphi: v_i \rightarrow V_i, C = \prod_{i \in N_n} \varphi(v_i), f: C \rightarrow Q \rangle, \quad (27)$$

где v_i – i -ая переменная системы; V_i – множество состояний соответствующей переменной; φ – функция, которая ставит в соответствие переменной v_i состояние из V_i ; C – множество всех полных состояний переменных; Q – множество рациональных чисел $[0, 1]$; f – функция, определяющая ограничения на переменных.

Определим функцию f , которая представляет собой функцию поведения:

$$f(c) = \begin{cases} \frac{N(c)}{\sum_{x \in C} N(x)}, \text{ при } |C| \leq |X|, \\ \frac{N(c)}{\max_{x \in C} N(x)}, \text{ при } |C| \geq |X|, \end{cases} \quad (28)$$

$N(c)$ – частота встречаемости состояния c , $|X| = \sum_{x \in C} N(x)$ – общее число появления событий (если $\Delta M = 1$) или общее число выборок, полученных в результате применения маски к системе данных (для $\Delta M \neq 1$).

Тогда получаем:

$$f = \begin{cases} \text{вероятностная} = \{(c, f(c)) \mid c \in C, 0 \leq f(c) \leq 1, \sum f(c) = 1\}, & \text{если } |C| \leq |X|, \\ \text{возможностная} = \{(c, f(c)) \mid c \in C, 0 \leq f(c) \leq 1, \sum f(c) \neq 1\}, & \text{если } |C| \geq |X|. \end{cases} \quad (29)$$

В случае использования вероятностной функции поведения для определения оптимальных систем из множества порождающих систем вычисляется порождающая нечеткость H , которая представляет собой шенноновскую энтропию [155] с множествами выходов C, E, G, \bar{G} и распределениями вероятностей, представленными соответствующими функциями; в случае исследования возможностей систем порождающая нечеткость определяется на основе U -нечеткости [24].

При порождении состояний переменных посредством применения ограничения M (маски) математическую модель задачи поиска оптимальной системы из множества порождающих систем сформулируем следующим образом:

$$\begin{cases} M \supset^k M_G, k \in N_q, \\ \{^k GS_M = \langle D, ^k F_{GB} = (I, ^k M_G, ^k f_{GB}) \rangle\}, \\ H_{\min} \rightarrow \min_k H(^k f_{GB}(c, e, \bar{g}, g)). \end{cases} \quad (30)$$

Величине H_{\min} соответствует множество M_{\min} , для элементов c, e, \bar{g}, g которого достигается минимум порождающей нечеткости. Конечный выбор осуществляется исследователем с учетом уровня сложности $^k M_G$.

Решение задач реконструктивного анализа осуществляется на эпистемологическом уровне структурированных систем. При этом рассматривается реконструктивная гипотеза является структурированной системой, сопоставимой с полной системой, для набора подсистем которой выполнено требование избыточности и условие покрытия. Структурированная система S представляет собой объединение нескольких подсистем – элементов

структурированной системы xES , в качестве которых выступает множество однотипных систем – I, D, GS , взаимодействующих между собой через общие переменные или каким-либо иным образом. Каждый элемент xES должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) определен на общем параметрическом множестве W ;
- 2) имеет общие переменные хотя бы с одним элементом – ${}^xV' \cap \bigcup_{\tau=1}^{q-1} {}^\tau V' \neq \emptyset$.

Построение математической модели структурированной системы связано с формированием полной системы. *Полная система*

$$S_F = \langle V', V, \varphi, C, f \rangle \quad (31)$$

включает все переменные из элементов структурированной системы и неразрывно с ней связана. В таком контексте xES выступают ее подсистемами, а S_F – их суперсистемой.

Определим математическую модель структурированной системы через множество порождающих систем:

$$\mathcal{S} = \{ {}^xGS \mid x \in N_q \}. \quad (32)$$

С учетом того, что каждый элемент ${}^xGS \in \mathcal{S}$ в тоже время является подсистемой полной системы S_F , то он связан с ней следующими соотношениями:

- 1) $V' = \bigcup_{x \in N_q} {}^xV'$;
- 2) $V = \bigcup_{x \in N_q} {}^xV$;
- 3) ${}^x\varphi: {}^xV' \rightarrow {}^xV$ такие, что $\{ {}^x\varphi(v_i) = \varphi(v_i) \mid i \in N_n \}$;
- 4) ${}^xC = \prod_{v_i \in {}^xV'} \varphi(v_i)$;
- 5) ${}^xf = [f \downarrow {}^xV']$.

Таким образом, множество состояний xC элемента из \mathcal{S} является подмножеством полных состояний C , а проекция xf включает только переменные, входящие во множество ${}^xV'$.

Структурированная система \mathcal{S} задает реконструктивную гипотезу относительно полной системы S_F , если каждый ее элемент ${}^xGS \in \mathcal{S}$ является подсистемой S_F и выполняются следующие условия [52]:

1) Условие покрытия:

$$\bigcup_{x \in N_q} {}^xV' = V'. \quad (33)$$

2) Условие избыточности:

$$\forall x, y \in N_q, {}^xV' \subseteq {}^yV' \Rightarrow x = y. \quad (34)$$

Условие покрытия продиктовано требованием использования всей информации о каждой переменной полной системы в реконструктивной гипотезе. Условие избыточности позволяет отбросить из реконструктивной гипотезы элементы структурированной системы, которые являются подсистемами других ее элементов. Информация, содержащаяся в таких подсистемах, хранится в более крупных элементах структурированной системы, а значит, эти подсистемы являются полностью избыточными.

Чем ближе реконструктивная гипотеза к оригинальной системе, тем лучше реконструкция. Близость двух сопоставимых систем рассматривается как потеря информации при замене f на f_S . Количество информации относительно полной системы S_F (либо заданной системы GS), потерянной в реконструктивной гипотезе, представленной системой \mathcal{S} , может быть измерено при помощи информационного расстояния. Для вероятностных систем информационное расстояние выражается известной формулой [24]:

$$\mu(f, f_S) = \frac{1}{\log_2 |C|} \sum_{c \in C} f(c) \log_2 \frac{f(c)}{f_S(c)}, \quad (35)$$

где $f(c), f_S(c)$ – вероятности состояний $c \in C$ переменных оригинальной системы и ее реконструкции, полученной из гипотезы \mathcal{S} ;

f, f_S – соответствующие распределения вероятностей;

$\frac{1}{\log_2 |C|} = const$ – нормирующий коэффициент, благодаря которому

информационное расстояние обладает свойством: $0 \leq \mu(f, f_S) \leq 1$.

Информационное расстояние порождающей системы [24]:

$$\mu_G(f, f_S) = \frac{1}{\log_2 |\mathbf{G}|} \sum_{\bar{\mathbf{g}} \in \bar{\mathbf{G}}} f(\bar{\mathbf{g}}) \sum_{\mathbf{g} \in \mathbf{G}} f(\mathbf{g} | \bar{\mathbf{g}}) \log_2 \frac{f(\mathbf{g} | \bar{\mathbf{g}})}{f_S(\mathbf{g} | \bar{\mathbf{g}})}. \quad (36)$$

Информационное расстояние для возможностей систем вычисляется по формуле [24]:

$$\hat{\mu}(f, f_S) = \frac{1}{\log_2 |C|} \int_0^l \log_2 \frac{|c(f_S, l)|}{|c(f, l)|} dl. \quad (37)$$

При объединении уточняющего упорядочения $\stackrel{r}{\leq}$ и упорядочения по информационному расстоянию $\stackrel{d}{\leq}$ формируется объединенное упорядочение по предпочтению $\stackrel{*}{\leq}$, связанное с задачей реконструкции, для всех полученных реконструктивных гипотез из множества \mathcal{H}_G .

Так, для гипотез $h_1, h_2 \in \mathcal{H}_G$ упорядочение по предпочтению определяется как:

$$h_1 \stackrel{*}{\leq} h_2 \leftrightarrow h_1 \stackrel{r}{\leq} h_2, h_1 \stackrel{d}{\leq} h_2. \quad (38)$$

Множество решений задачи реконструкции формируется исходя из этого предпочтения. Следовательно, для заданной полной системы S_F и множества реконструктивных гипотез \mathcal{H}_G , множеством решений задачи реконструкции будет являться подмножество $\mathcal{H}'_G \subset \mathcal{H}_G$, такое, что:

$$\mathcal{H}'_G = \{h_1 \in \mathcal{H}_G \mid \forall h_2 \in \mathcal{H}_G : h_2 \stackrel{*}{\leq} h_1 \Rightarrow h_1 \stackrel{*}{\leq} h_2\}, \quad (39)$$

то есть реконструктивные гипотезы из \mathcal{H}'_G либо эквивалентны, либо несравнимы между собой с точки зрения объединенного упорядочения по предпочтению $\stackrel{*}{\leq}$.

Таким образом, в общем виде задачи, рассматриваемые в реконструктивном анализе, представлены на рисунке 9.

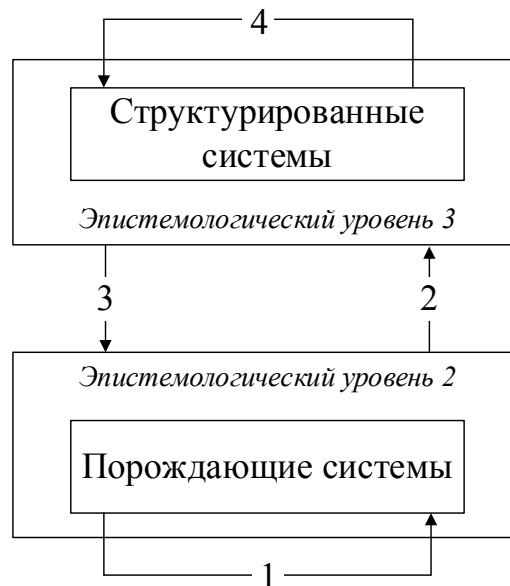


Рисунок 9 – Структура взаимодействия эпистемологических уровней при решении задач реконструктивного анализа:

1 – сравнение полной порождающей системы, выраженной структурированной системой, с оригинальной полной порождающей системой; 2 – переход от полной порождающей системы к структурированной системе, выступающей в качестве ее реконструктивной гипотезы; 3 – гипотеза (структурированная система), полученная в результате оценки реконструируемости; 4 – переход от конкретной структуры системы к ее непосредственным уточнениям.

2.2 Исследование возможности применения системологических методов в инструментальных средствах для поддержки принятия решений относительно неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой

В области применения системологии лежат задачи исследования, построения и моделирования систем. Установление скрытых внутренних взаимосвязей между элементами системы и их анализ позволяет прогнозировать ее состояние и определить оптимальное воздействие на целевые компоненты для получения желаемого поведения системы. Многочисленные модели, основанные на классическом анализе, зачастую неспособны устанавливать существенные взаимосвязи или, ввиду неадекватного их построения для систем вида «черный

ящик», выдают поверхностные связи за устойчиво сильную корреляцию. Таким образом, при исследовании класса систем, таких как *НССДС*, математическое моделирование которых по каким-либо причинам затруднено, целесообразно использование методов, основанных на исследовании реконструктивных свойств самой системы, которые позволяют выявлять глубокие внутренние связи между ее элементами. Так как системные задачи, возникающие в области *НССДС*, в системологии могут быть представлены в виде общесистемных задач (при помощи заложенного механизма абстрагирования/конкретизации), то посредством автоматизации математического аппарата системологии для его применения в инструментальных средствах обеспечивается возможность получения решения в различных предметных областях, независимо от структурного и элементного состава системы. Методологическая база системологии позволяет проводить математическое моделирование и исследование систем без установления законов их функционирования, деформации постановки решаемых системных задач (что в других методах зачастую требуется в условиях ограничений методов), а также обрабатывать полученные эмпирические данные, опираясь на установленные параметрически инвариантные свойства системы.

Математический аппарат порождающих систем дает возможность определить оптимальное представление данных с точки зрения пространственных связей для дальнейшего исследования систем и выбора существенных элементов, а также возможного порождения состояний переменных системы, например, в случае малой эмпирической базы исследования, осложняющей оценку взаимосвязей элементов системы с достаточной надежностью. Однако применение математического аппарата порождающих систем ограничено в распространении ввиду отсутствия четких алгоритмов генерации систем и получения оптимальных из них.

Реконструктивный анализ систем осуществляется на третьем эпистемологическом уровне, так, методы исследования реконструктивных гипотез сводятся к математическому аппарату структурированных систем.

Однако, из-за критически быстрого роста количества реконструктивных гипотез, формируемых указанными методами при увеличении числа параметров, определяющих состояние системы, основатель системологии Джордж Клир не смог повсеместно распространить разработанную им методику на сложные системы [52, 55]. Ввиду указанного недостатка для задач синтеза систем чаще применяют методы, основанные на метасистемах в противоположность структурированным системам. Метасистемный подход реализует своего рода функцию интегрирования систем, которая осуществляется путем их замещения. Достоинство его в том, что он не предполагает сложных вычислений, реализует замену одной системы в процессе ее функционирования на другую (набор систем), отобранную из группы элементов. Такой подход дает возможность определить границы перехода процесса из одного состояния в другой, но не позволяет получить информацию о глубинных взаимосвязях между элементами системы и установить их оптимальные состояния – в системологии наличие и силу взаимосвязей компонентов системы позволяет определить только математический аппарат структурированных систем при исследовании реконструктивных свойств. Следовательно, необходимо устранить сложности, препятствующие его использованию.

Применение численного метода информационных структурированных систем Джорджа Клира ограничено следующими трудностями:

1. Метод данного эпистемологического уровня ни в случае нейтральных, ни в случае направленных систем не предполагает какого-либо выделения параметров системы, наибольшим образом интересующих исследователя. Так, в процессе решения системных задач осуществляется структурирование всех реконструктивных гипотез, независимо от наличия в них значимых переменных. Реконструктивный анализ (оценка) производится после получения полного числа гипотез. Данное обстоятельство приводит к тому, что метод включает большой объем вычислений, учитывая тот факт, что каждая гипотеза – это система с индивидуальной структурой и содержанием, которая требует: расчета функций поведения, решения задач идентификации и реконструкции, проверки

согласованности данных, вычисления и сопоставления информационного расстояния. Тем самым возможность применения аппарата структурированных систем при решении системных задач и в процессе принятия оптимальных решений обеспечивается путем разработки и внедрения модифицированного численного метода структурированных систем, модификации входящих в него процедур поиска решеток уточнения и процедур отбора реконструктивных гипотез.

2. Еще одна нерешенная проблема – крайне быстрый рост количества реконструктивных гипотез с увеличением числа переменных. Необходимо осуществить выделение блока генерации и анализа реконструктивных гипотез с целью модификации, которая должна привести к отсечению значительной части множества реконструктивных гипотез на последовательных этапах уточнения структурированных систем, без потери согласованности, значимости гипотез и информационного расстояния между альтернативами и полной системой. Встречается применение метода с использованием только тех гипотез, информационное расстояние которых является строго минимальным, однако такой выбор не входит в алгоритмы метода и, одновременно с этим, не обоснован с точки зрения связи со значимыми переменными и не учитывает предпочтений исследователя (лица, принимающего решение), лишая его возможности расширить поиск подходящих реконструкций (альтернатив решения).

Кроме того, существует необходимость реализации алгоритмов, исключающих избыточные итерации при проверке реконструируемости, которые могут привести к заикливанию процесса поиска решения. Следовательно, требуется учесть указанную необходимость в итерационных алгоритмах системологии, в рамках модифицированного численного метода структурированных систем такой алгоритм реализует итеративная процедура соединения.

2.3 Разработка численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них

Исследование систем в системологии начинается с формирования исходной системы (рисунок 4), что позволяет приступить к сбору данных с фиксацией рассматриваемых свойств системы при определенных базах и соответствующих им значениях параметров. Затем осуществляется обработка полученных данных, в процессе которой для элементов заданной системы устанавливаются параметрически инвариантные свойства, оказывающие влияние на представление данных и, при необходимости или при отсутствии достаточного объема данных, позволяющие реализовать порождение их состояний. Системология предоставляет исследователю научно обоснованные междисциплинарные методы, позволяющие выполнить данный этап эмпирического исследования. При этом отмечается востребованность системологических методов данного направления [32, 37, 38, 116 и другие]. В то же время основоположником системологической методологии для методов эпистемологического уровня порождающих систем (второй уровень иерархии) не предоставляются четкие численные алгоритмы их генерации и отбора. Необходимость создания таких алгоритмов в рамках диссертационного исследования обусловлена тем, что анализ *НССДС* также предполагает решение задачи отбора наиболее информативных свойств, которая входит в область задач методов этого уровня. Выявление значимых переменных посредством моделирования систем и применения численных методов второго уровня позволит реализовать экономичное представление данных в системе. Порождающие системы формируются на основе масок: определенные маской ограничения накладываются на множество состояний переменных, заданное на упорядоченном параметрическом множестве, причем при определенном значении параметра конкретное состояние переменных зависит не только от множества состояний самой переменной, но и от состояний переменных выбранного соседства, которое заложено в маске [50].

На основе заданных ограничений производится отбор данных из общего массива, при этом полученная система должна быть согласована с системой

данных (то есть несогласованность функций поведения на соответствующих переменных должны быть минимизирована). К порождающим системам помимо требования согласованности также предъявляются требования детерминированности, простоты и соответствия [24]. Из требования соответствия следует, что функции поведения полученных порождающих систем однозначно определяются процедурой выборки по маскам.

Состав порождающих систем определяется переменными *ОПС*, а методы данного уровня оперируют переменными и параметрами, которые были получены путем абстрагирования методами предыдущих уровней эпистемологической иерархии. Так как общая представляющая система входит в исходную систему и лежит в основе всех систем вышестоящих эпистемологических уровней, то становится возможным применение методов независимо от семантики задачи. Анализ значимости свойств исследуемой системы производится исходя из структуры связей между элементами оптимальных порождающих систем, сформированных из системы данных по маскам различного уровня сложности с учетом методологических отличий. Формирование порождающих систем включает построение систем с поведением. Поведение системы характеризует общие параметрически инвариантные ограничения, накладываемые на переменные *ОПС*. На основе таких ограничений также осуществляется порождение состояний переменных при заданном параметрическом множестве.

Для реализации методов эпистемологического уровня порождающих систем, был создан численный алгоритм генерации содержательных подмасок заданной наибольшей допустимой маски, формирования по ним порождающих систем и поиска оптимальных из них. Маска может выступать в качестве представителя порождающей системы в случае, когда система формируется путем применения маски порождения к системе данных (30). В процессе исследования *НССДС* интуитивно понятным для лица, принимающего решение, представляется вывод, осуществляемый в виде набора пространственных структур выборочных переменных (визуального представления масок), удовлетворяющих требованиям, предъявляемым на данном эпистемологическом уровне, и требованию

содержания в них наибольшего количества информации об исходной системе с учетом соответствующих значений уровней сложности и порождающих нечеткостей (30).

Из иерархической организации моделей и методов системологии следует, что на уровне порождающих систем уже сформированы опорные исходная система и система данных. Таким образом, в численном алгоритме должны быть отражены параметры наибольшей допустимой маски M , от которых будут непосредственно зависеть параметры каждой маски ${}^k M$ ($k \in \overline{1, \hat{N}}$), входящей во множества генерируемых содержательных подмасок L , и которые будут заданы в качестве начальных условий. Кроме того, для последующего создания компьютерного алгоритма на базе численного произведем переход от принятого пространственного представления маски в виде матрицы, которая, например, для $V' = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $\lambda = \{\lambda(t, w), \lambda(t+1, w), \lambda(t+2, w)\}$, где $\lambda: M \rightarrow N_q$ – однозначная функция кодирования, которая служит целям идентификации выборочных переменных, выглядит следующим образом:

$$M = \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{matrix} \begin{bmatrix} t & t+1 & t+2 \\ (v_1, \lambda_t(w)) & (v_1, \lambda_{t+1}(w)) & (v_1, \lambda_{t+2}(w)) \\ (v_2, \lambda_t(w)) & (v_2, \lambda_{t+1}(w)) & (v_2, \lambda_{t+2}(w)) \\ \dots & \dots & \dots \\ (v_n, \lambda_t(w)) & (v_n, \lambda_{t+1}(w)) & (v_n, \lambda_{t+2}(w)) \end{bmatrix}, \quad (40)$$

к маске M' , используемой в реализации программных матриц данных и содержательных подмасок:

$$M' = M^T. \quad (41)$$

Согласно математической модели задачи поиска оптимальных порождающих систем (30) необходимо провести исследование всех содержательных подмасок заданной наибольшей допустимой маски. В численном алгоритме для простоты изложения M' будем обозначать через M . Численный алгоритм поиска оптимальных порождающих систем, созданный в рамках диссертационного исследования, состоит из следующей последовательности шагов:

1. задать направление движения маски;
2. задать $\Delta M, |M|$ ($|M|$ – мощность M);
3. задать E ;
4. если $|E| > 0$, то задать наличие информации о переменных $e \in E$,

$$\hat{i} = \begin{cases} 0, & \text{если информация есть,} \\ 1, & \text{если информации нет;} \end{cases}$$
5. генерация множеств масок L ;
6. задать $i = 0, m = |M|$;
7. задать $k = 0, l = |L_i|$, где $L_i \subset L$ ($|L_i|$ – мощность L_i);
8. произвести разбиение ${}^k M$ на $M_g, M_{\bar{g}}, M_e$ с учетом направления движения маски, где ${}^k M \in L_i$,

$$M = \begin{cases} \bigcup_{n \in N_{|V|}} (\{s_{(n-1)\Delta M+1}, \dots, s_{(n-1)\Delta M+\Delta M}\}), & \text{если } t \text{ возрастает,} \\ \bigcup_{n \in N_{|V|}} (\{s_{(n-1)\Delta M+\Delta M}, \dots, s_{(n-1)\Delta M+1}\}), & \text{если } t \text{ убывает,} \end{cases}$$

и формирование соответствующих функций поведения;

9. вычислить нечеткость:

$${}^k H = \begin{cases} H(\mathbf{G} | \bar{\mathbf{G}}) = - \sum_{c \in C} f(c) \log_2 f(c) + \sum_{\bar{\mathbf{g}}} {}^k f(\bar{\mathbf{g}}) \log_2 {}^k f(\bar{\mathbf{g}}) = H(C) - H(\bar{\mathbf{G}}), & \text{если } |E| = 0, \\ H(\mathbf{G} | \mathbf{E} \times \bar{\mathbf{G}}) = H(C) - H(\mathbf{E} \times \bar{\mathbf{G}}), & \text{если } \hat{i} = 0, \\ H(\mathbf{G} | \mathbf{E} \times \bar{\mathbf{G}}) = \frac{1}{|\mathbf{E}|} \left(\sum_{\mathbf{e} \in \mathbf{E}} H(\bar{\mathbf{E}} | \mathbf{e}) - \sum_{\mathbf{e} \in \mathbf{E}} H(\bar{\mathbf{G}} | \mathbf{e}) \right), & \text{если } \hat{i} = 1; \end{cases}$$

10. если $k = 0$ или ${}^k H < H_{\min}$, то ${}^k H \rightarrow H_{\min}, {}^k M \rightarrow M_{\min}$;
11. если $k < l$, то $k + 1 \rightarrow k$, перейти на шаг 8;
12. $(H_{\min}, M_{\min}) \rightarrow X_i$, записать пару X_i как оптимальную пару уровня сложности i ;
13. если $i < (m - 2)$, то $i + 1 \rightarrow i$, перейти на шаг 7, иначе перейти на шаг 14;
14. конец.

Для систем, основанных на возможностных функциях поведения, на девятом шаге вычисляется U -нечеткость.

В вышеизложенный алгоритм на шаге 5 входит созданный в рамках представленного исследования алгоритм генерации масок, на основе которых осуществляется построение порождающих систем, включающий следующие шаги:

1. задать $m = \Delta M \cdot |V'|$ ($|V'|$ – мощность V'), $M_0 = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $n = \overline{1, m}$,
 $M_0 \rightarrow L_0$;
2. задать $i = 0$;
3. задать $q = 0$, $l = |L_i|$ ($|L_i|$ – мощность L_i);
4. задать $k = 1$, $r = 0$;
5. если $s_k \in M_q$, где $M_q \in L_i$, то $M_q \setminus \{s_k\} \rightarrow M_r$;
6. если $M_r \neq \emptyset$, $M_r \notin \bigcup_{y \in Y} L_y$, где $Y = \{y \mid y \in \mathbb{Z}, 0 \leq y \leq i\}$, и M_r удовлетворяет требованиям содержательной маски, то записать маску M_r в L_{i+1} , $r + 1 \rightarrow r$;
7. если $k < m$, то $k + 1 \rightarrow k$, перейти на шаг 5;
8. если $q < (l - 1)$, то $q + 1 \rightarrow q$, перейти на шаг 4;
9. записать L_{i+1} в L , если $i < (m - 2)$, то $i + 1 \rightarrow i$ перейти на шаг 3, иначе на шаг 10;
10. конец.

Создание численного алгоритма поиска оптимальных порождающих систем обусловлено необходимостью автоматизации процесса генерации порождающих систем и выбора их оптимальных вариантов (в том числе, на отдельных уровнях сложности), а также унификации этих процессов. Отметим, что выявление значимых переменных на основе моделирования методами порождающих систем дает оптимальное с точки зрения пространственных связей представление данных. Разработанный алгоритм позволил применить методы эпистемологического уровня порождающих систем в инструментальных средствах для поддержки принятия решений [50], он апробирован в рамках

программной реализации на эмпирических данных из исследований, в том числе проводимых в работах [24, 156], и полностью с ними согласуются [49].

2.4 Разработка модифицированного численного метода структурированных систем

Установлено, что математический аппарат структурированных систем в исходном виде не включает учет значимости переменных в составе системы с позиции целей исследования. Кроме того, при моделировании структурированной системы формируется связанная с ней полная система S_F (31), осуществляется оценка близости реконструктивной гипотезы, представленной данной структурированной системой, с соответствующей полной системой, которая выражается через информационное расстояние μ .

Выделим из множества свойств системы, представленных множеством переменных системы V' , те из них, которые наибольшим образом интересуют исследователя, участвуют в реконструктивном анализе и влияние на которые рассматривается. Таким образом, нахождение оптимальных структурированных систем требует отражения указанных свойств, для этого расширим модель (32), записав ее в следующем виде:

$$\hat{S} = \{ {}^xGS_M = \langle (\langle {}^xV', {}^xV, {}^xW', {}^xW \rangle, d: {}^xW \rightarrow {}^xV), {}^xF_{GB} = ({}^xI, {}^xM_G, {}^xf_{GB}) \rangle \mid x \in N_q, \hat{V} \subset \bigcup_{x \in N_q} {}^xV', \mu \}, \quad (42)$$

где $v_i \in \hat{V}$ – выделенные целевые переменные;

μ – значение информационного расстояния, соответствующего структурированной системе.

Модификация метода структурированных систем направлена на реализацию представленной математической модели, повышение эффективности численного исследования систем при решении задач идентификации и реконструкции с учетом наличия в системе целевых переменных и выполнения требования соответствия системы ограничениям, предъявляемым исследователем к информационному расстоянию, и предполагает, в том числе, модификацию входящей в метод итеративной процедуры.

На начальном этапе проведена модификация общего алгоритма численного метода структурированных систем, вследствие которой он представляет собой последовательность следующих шагов [52]:

- 1) задать множество целевых переменных \hat{V} ;
- 2) задать допустимое отклонение информационного расстояния $\Delta\mu$, %;
- 3) задать значение допустимой погрешности согласованности Δ_S ;
- 4) выполнить процедуру поиска решеток уточнения;
- 5) выполнить базовую процедуру соединения для структурированной системы, соответствующей каждой решетке из результатов поиска;
- 6) если несмещенная реконструкция не найдена, выполнить итеративную процедуру соединения;
- 7) если несмещенная реконструкция не найдена, система не согласована, реконструкции не существует;
- 8) выполнить отбраковку несодержательных или неудовлетворяющих требованиям исследователя реконструктивных гипотез и соответствующих им решеток уточнения;
- 9) если дальнейшее уточнение возможно, перейти на шаг 4;
- 10) вывод на основе реконструктивного анализа.

Для реализации наборов процедур в составе модифицированного численного метода структурированных систем, а также уменьшения количества вычислений путем сокращения числа реконструктивных гипотез, с сохранением упорядочения решеток по степени (уровню) уточнения, был разработан модифицированный численный алгоритм *RG*-процедуры. В соответствии с математической моделью (42) в рассмотрение включены целевые переменные (при этом мощность множества целевых переменных меньше мощности множества элементов решеток

уточнения $|\hat{V}| < \left| \bigcup_{k \in N_q} {}^k S \right|$, а переменные системы выражаются их

идентификаторами). Модифицированный численный алгоритм *RG*-процедуры включает следующие шаги [52]:

- 1) задать структуры $G_i = \{^k S \mid k \in N_q\} \in G_n : \hat{V} \subset \bigcup_{k \in N_q} ^k S, i \in N_{|G_n|}$;
- 2) присвоить $k = 0$;
- 3) если $k < q$, то $k + 1 \rightarrow k$, иначе перейти на шаг 6;
- 4) если $|^k S| \geq 2$, то $(G_i \setminus \{^k S\}) \cup X \rightarrow R$, где $X = \{x \mid x \subset ^k S, |x| = |^k S| - 1\}$ и $\forall G_i \in G_n \exists ^\tau S \in G_i : \hat{V} \subset ^\tau S, |^\tau S| > |\hat{V}|, \tau \in N_q$, иначе перейти на шаг 3;
- 5) $R \rightarrow \hat{Q}_R$, где \hat{Q}_R – неизбыточный аналог R , если выполняется условие $\mu(f, \hat{f}) \leq \left[\min_l \mu(f, ^l f) \cdot \left(1 + \frac{\Delta\mu}{100\%} \right) \right]$, где l – конкретный уровень уточнения, \hat{f} – соответствующее реконструктивной гипотезе, полученной на основе \hat{Q}_R , распределение вероятности, то записать \hat{Q}_R в качестве непосредственного уточнения G_i , перейти на шаг 3;
- 6) конец.

Представленная модифицированная процедура осуществляет поиск решеток уточнения с учетом целевых переменных $v_i \in \hat{V}$ и значения отклонения $\Delta\mu$. Проверка, осуществляемая на четвертом шаге, обеспечивает на каждом уровне уточнения наличие хотя бы одного элемента G_i общих структур G_n , содержащего идентификаторы из набора \hat{V} . Если данное требование не выполняется, решетка уточнения G_i исключается и не участвует в дальнейшей процедуре поиска. Предложенная модификация позволяет значительно сократить количество численно обрабатываемых реконструктивных гипотез, путем отбраковки гипотез, не входящих в область исследования, то есть тех, в которые не включены целевые переменные рассматриваемой системы и информационное расстояние которых говорит об их малой информативности и значимости.

Введенное ограничение $\Delta\mu$ на информационное расстояние функции поведения \hat{f} реконструктивной гипотезы, полученной на основе структурированной системы, соответствующей конкретной решетке уточнения,

подразумевает выбор и уточнение тех решеток, для которых соответствующее информационное расстояние $\mu(f, \hat{f})$ удовлетворяет условию [51, 52]:

$$\min_l \mu(f, {}^l f) \leq \mu(f, \hat{f}) \leq \min_l \mu(f, {}^l f) \cdot \left(1 + \frac{\Delta\mu}{100\%}\right), \quad (43)$$

где $\mu(f, \hat{f})$ – информационное расстояние, соответствующее полученной реконструктивной гипотезе;

$\min_l \mu(f, {}^l f)$ – минимальное информационное расстояние на уровне уточнения l ;

$\Delta\mu$ – допустимый процент отклонения от минимального информационного расстояния, задается исследователем.

Таким образом, для того, чтобы проанализировать решетки уточнения, полученные на каждом этапе, необходимо рассчитать соответствующие информационные расстояния. Из формул (35-37) следует, что информационные расстояния вычисляются для реконструкций полной системы. Решетка уточнения представляется набором подсистем, составляющих структурированную систему, чтобы перейти от решетки уточнения к реконструкции полной системы, необходимо решить задачу идентификации, то есть задачу нахождения реконструктивной гипотезы на основе имеющихся подсистем.

В рамках решения задачи повышения эффективности процесса поиска несмещенной реконструкции при идентификации системы была модифицирована итеративная процедура соединения. Модификация включает введение ограничения на число выполняемых соединений ψ , при этом определение значения допустимой погрешности Δ_S предоставляется исследователю систем. Рассмотрим более подробно разработанный модифицированный алгоритм итеративной процедуры соединения:

1) присвоить $j = 0$, $i = 1$, $\psi = const$ и задать $f_0 = f$;

- 2) произвести соответствующую группировку аргументов функций ${}^j f$ и f_{i-1} , выполнить операцию соединения ${}^j f * f_{i-1} \rightarrow f_i$ для вырожденного случая;
- 3) если $i \neq 0 \pmod{q}$, то $i+1 \rightarrow i$, $j+1 \pmod{q} \rightarrow j$, перейти на шаг 2;
- 4) если $i > \psi$, то несмещенная реконструкция не найдена, перейти на шаг 6;
- 5) если $\exists c \in C: |f_i(c) - f_{i-q}(c)| > \Delta_S$, то $i+1 \rightarrow i$, $j+1 \pmod{q} \rightarrow j$, перейти на шаг 2;
- 6) конец.

Для учета целей идентификации в работе итеративной процедуры соединения значение допустимой погрешности согласованности Δ_S задается исследователем, что позволяет расширить поиск оптимальной реконструкции. Введенное ограничение ψ на число соединений позволяет определить этап завершения выполнения процедуры и сделать вывод о возможности реконструкции (реконструктивную гипотезу не удалось получить – подсистемы не совместимы).

Модифицированный численный метод структурированных систем разработан с целью разрешения трудностей, возникающих при использовании метода структурированных систем Джорджа Клира, которые были выявлены в рамках диссертационной работы при исследовании возможности применения системологических методов в инструментальных средствах для поддержки принятия решений относительно неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой [43, 51, 52]. Модифицированный метод положен в основу программной реализации инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем. Расширен математический аппарат структурированных систем – введены целевые переменные, поиск реконструктивных гипотез производится в окрестности указанных переменных с учетом информационного расстояния. Модифицированы алгоритмы решения системных задач и, таким образом, обеспечено вхождение целевых переменных в реконструктивные гипотезы и их исследование,

определение влияния элементов системы на заданные целевые переменные. Выбор целевой переменной (их может быть несколько) предоставляется исследователю (пользователю инструментальных средств), при этом целевыми не могут быть все переменные, входящие в систему.

2.5 Проектирование инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем

Информация о значимых свойствах неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой оказывает существенное влияние на процесс исследования, ее извлечение из исходных данных осуществляется посредством моделирования – построения модели системы на основе конкретной рассматриваемой системы для проведения необходимых экспериментов [157]. Цель моделирования достигнута в том случае, когда становится возможным на основе этой информации принять оптимальное решение [158]. Признана эффективность системного подхода в моделировании различной сложности, который позволяет учитывать разнообразные свойства систем и их значимость на всех этапах исследования в различных предметных областях, что нашло свое отражение в работах по экологии [159, 160], экономике [161], в инженерных науках [76], в исследовании социальных систем и организаций [162]. Математическим обеспечением систем различных видов в целом занимается теория систем. Теорию систем определяют, как научную дисциплину, которая изучает объекты (системы), независимо от их природы, в контексте взаимосвязей элементов с учетом характера их изменений. Важно отметить, что выводы об исследуемых системах формулируются с опорой на взаимодействие составляющих систему элементов, абстрагировано от их конкретных типов [163, 164]. Одним из направлений теории систем является системология Джорджа Клира, в которой моделирование систем включает подъем по иерархии эпистемологических уровней (рисунок 4) и которая полностью базируется на фундаментальных принципах системного подхода:

- Целостность – система рассматривается и как целое, и как подсистема;
- Иерархичность – элементы методологии организованы в структуру соподчинения элементов низшего уровня элементам высшего уровня;
- Структуризация – элементы систем и их взаимосвязи рассматриваются с точки зрения организационной структуры (учет зависимости функционирования системы от свойств ее структуры);
- Множественность – описание системы, ее состава и структуры множеством разнообразных моделей.

Основные цели моделирования систем, которые могут быть достигнуты при помощи системологии [165]:

- а) определение взаимосвязей элементов системы и характеристик этих взаимосвязей;
- б) исследование свойств системы на основе имеющихся экспериментальных данных;
- в) оценка соответствия модели реальной системе;
- г) прогнозирование состояния системы;
- д) обеспечение поведения системы, соответствующего заданным критериям оптимальности.

Так как реализуемые в инструментальных средствах математические методы и алгоритмы направлены на решение системных задач, определим их. Системные задачи – это задачи исследования систем и относящихся к ним условий. Системные задачи, в которых исследуются система и ее свойства, называются элементарными. Наиболее существенными из них являются задачи проверки системы на корректность. В инструментальных средствах, реализующих системологические методы, решаются следующие элементарные задачи: проверка соответствия свойствам вероятностного распределения; анализ непротиворечивости математических свойств; анализ корректности определения целевых параметров; определение *КПС*. Системные задачи, в которых рассматриваются две и более системы, называются базовыми. Решение базовых системных задач подразумевает переход от известных объектов и их свойств к

неизвестным и связано с двумя типами систем: начальными системами – системами, которые заданы исследователем; терминальными системами – системами решения (рисунок 10).



Рисунок 10 – Иллюстрация базовой системной задачи на примере поиска оптимальных порождающих систем

К базовым системным задачам относятся: декомпозиционные задачи, решаемые при проектировании систем; задачи идентификации и реконструкции; задача получения из заданной системы данных всех порождающих систем, удовлетворяющих требованиям максимальной согласованности, минимальной сложности и порождающей неопределенности, построение которых производится на основе масок, являющихся подмасками наибольшей допустимой маски. Системные задачи также подразделяются по эпистемологическим типам [24]. Процесс принятия решения в рамках программного комплекса подразумевает переход от конкретной задачи, сформулированной в терминах конкретной предметной области, к обобщенной системной задаче, решение которой производится одним из входящих в него модулей (рисунок 11).

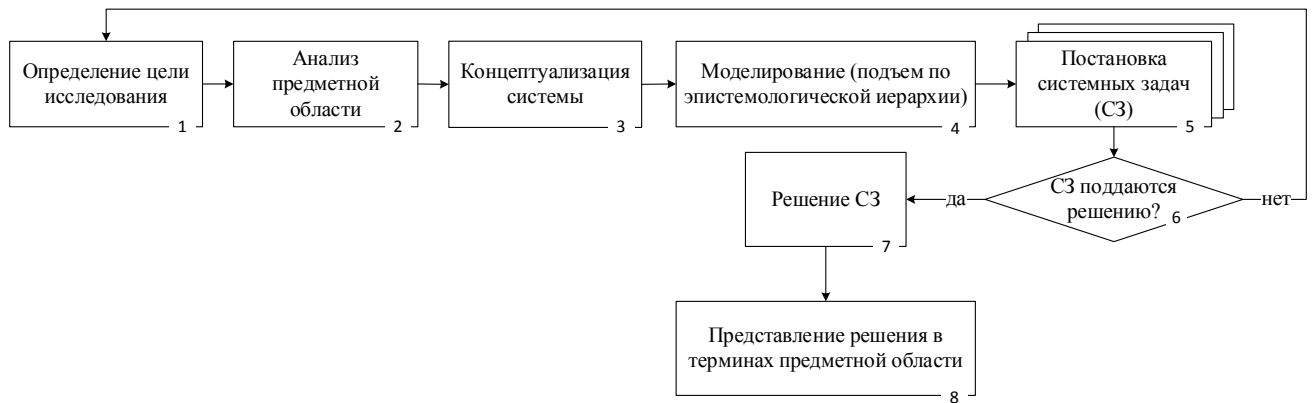


Рисунок 11 – Схема методики решения системных задач

Для решения системных задач посредством разработанных численных алгоритмов и методов спроектированы и созданы инструментальные средства для поддержки принятия решений, которые представляют собой три программных модуля (рисунок 12).

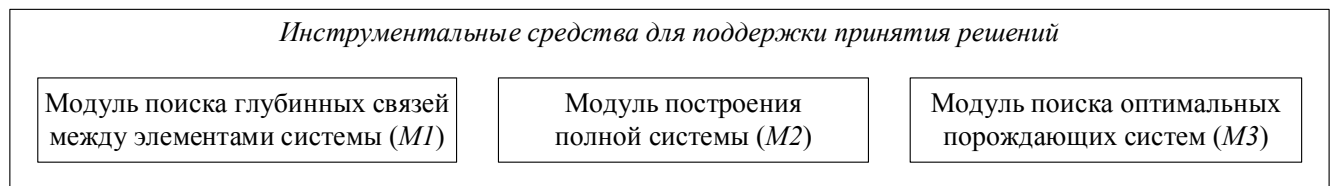


Рисунок 12 – Модульная структура комплекса программ

Программный комплекс является междисциплинарным, не требует установки дополнительного программного обеспечения, разработан на языке программирования C++ с применением фреймворка Qt и представляет собой комплекс кроссплатформенных программ.

2.5.1 Проектирование модуля поиска глубинных связей между элементами системы

Работа модуля поиска глубинных связей между элементами *НССДС* (обозначим модуль как *M1*) состоит в исследовании реконструктивных свойств системы, основанном на применении модифицированного численного метода структурированных систем. На первом этапе работы модуля (*M1.Э1*) пользователь на основе исходных данных определяет систему S_S : множество свойств a_i и баз

b_j , конкретные значения (диапазоны значений) для $KПС$, множества V', \hat{V}, W' . По заданным исследователем данным автоматически, средствами программного модуля, строится $ОПС$ [166]. Так производится концептуализация системы – выделение границ системы, ее входных и выходных элементов. На данном этапе осуществляется решение элементарных системных задач.

На втором этапе ($М1.Э2$) исследователь задает конкретную матрицу данных (таблица 4). Методы системологии оперируют не только данными, полученными в результате исследования реальных систем, но и данными, полученными в искусственных системах, например, математических. Будем данные этих двух видов называть эмпирическими. В рамках текущего этапа работы модуля посредством канала абстрагирования/конкретизации осуществляется переход от матрицы эмпирических данных к системе данных, состоящей из абстрактных состояний переменных (свойств), при этом системная семантика сохраняется. Те данные, которые не были описаны в S_S и, соответственно, не могут быть абстрагированы, исключаются из рассмотрения путем удаления из системы данных. Элементы базы, то есть конкретные состояния переменных параметрического множества, при которых производилось измерение (наблюдение или определение) свойств, так же абстрагируются.

Таблица 4 – Пример матрицы данных

№	Содержание элемента №1, мг	Содержание элемента №2, мг	Схема рациона	Температура, °С
1	100	20	Simple	23
2	200	40	Intensive	20
3	50	70	Simple	22
4	700	100	Enriched	25
5	900	58	Enriched	22
...
2140	150	39	Simple	19

Вошедшие в систему данных наборы состояний переменных (обозначим их как c) обобщаются: подсчитывается число их повторений $N(c)$ (частота встречаемости состояний c), после чего остаются неповторяющиеся наборы и по одному набору из повторяющихся, остальные из которых удаляются. Таким

образом, результирующая система данных с семантикой D_S в конечном счете состоит из уникальных наборов состояний (рисунок 13).

V'				
v_1	v_2	...	v_i	N
0	0	...	4	45
1	2	...	3	20
...
5	4	...	1	38

i
 $v_i \in V'$

t $w_j \in W'$

Рисунок 13 – Табличное представление системы данных

$MI.Э2$ включает переход от частот встречаемости к вероятностной мере нечеткости, следствием которого является сформированная система с поведением.

На третьем этапе ($MI.Э3$) решаются базовые системные задачи, то есть производится анализ реконструктивных свойств, включающий формирование структурированных систем, решение задач идентификации и реконструкции [167]. $MI.Э3$ охватывает математические процедуры сравнения вариантов решения (реконструктивных гипотез) и исключения из рассмотрения тех вариантов, которые не удовлетворяют заданным исследователем условиям (рисунок 14). Таким образом, инструментальные средства реализуют модели систем и модели принятия решений, математическое содержание которых состоит в выводе эффективных способов реализации правила отбраковки плохих вариантов [168].

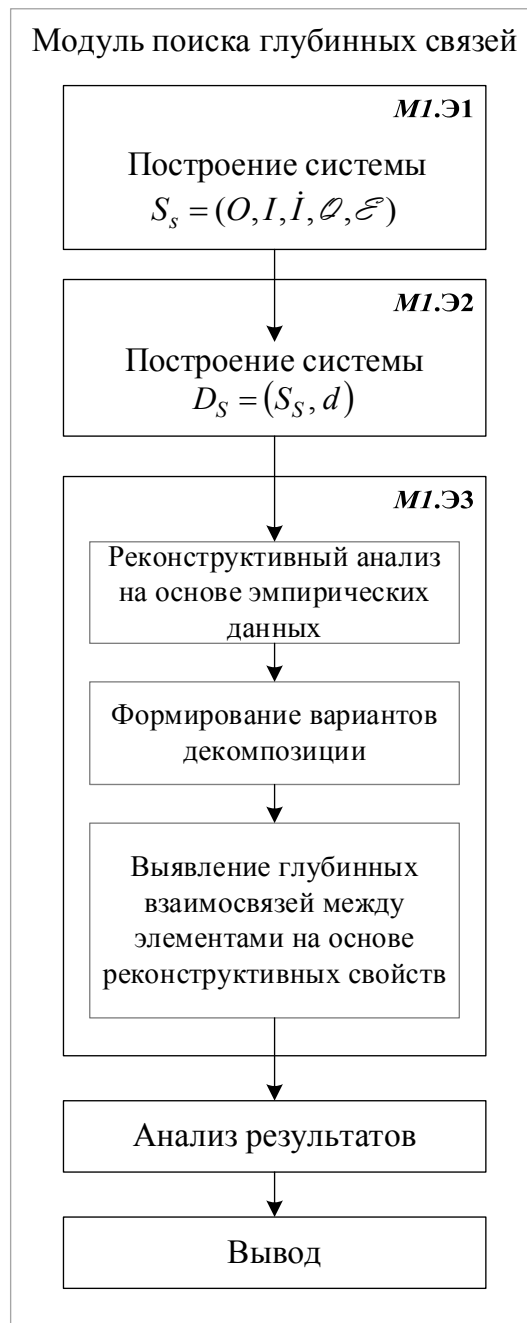


Рисунок 14 – Структурная схема *MI*

Реконструктивный анализ позволяет произвести оптимальную декомпозицию системы, установить глубинные связи между ее элементами и определить состояния переменных для желаемого развития системы (достижения оптимального значения целевых переменных). При этом полученные в программном модуле результаты должны быть доступны для отображения в графическом виде (в виде таблиц, графиков, отчетов).

2.5.2 Проектирование модуля построения полной системы

Модуль построения полной системы ($M2$) предоставляет исследователю, располагающему информацией об отдельных системах, возможность рассмотреть не только их внутренние связи, но и связи с другими системами в рамках более сложного образования – полной системы. Для получения ответа на вопрос об их глобальной совместимости применяется математический аппарат структурированных систем, процедуры соединения указанных систем в полную систему.

На первом этапе выполнения модуля $M2$ ($M2.Э1$) исследователь задает множество переменных и их возможные состояния (рисунок 15); при помощи конструктора формирует подсистемы – элементы структурированной системы \hat{S} ; для каждого элемента из \hat{S} определяет значения функции поведения ${}^x\hat{f}_B$ для сформированных наборов состояний переменных. Ввод значений элементов параметрического множества не требуется, так как функция ${}^x\hat{f}_B$ выражает состояния переменных из множества C и не зависит от конкретных значений параметров, то есть параметрически инварианта. На этом этапе формируется набор систем с поведением.

На втором этапе ($M2.Э2$) производится построение полной системы. Такое построение предполагает совместимость подсистем, то есть выполнение требования существования несмещенной реконструкции – системы с поведением, проекция функции поведения которой на множества выборочных переменных xS из состава подсистем совпадает с соответствующими функциями поведения этих подсистем с заданной исследователем точностью Δ_S . В случае, если указанные элементы \hat{S} совместимы и позволяют образовать полную систему, то будут выведены результаты вычислений. Если полная система получена посредством базовой процедуры соединения (выполнен точный поиск), то отобразится результирующая система с поведением. Если же полная система получена при помощи итеративной процедуры соединения, то есть с заданной точностью, то будут дополнительно выведены результаты промежуточных итераций. В случае,

когда итеративная процедура не привела к положительному результату, будет выведено сообщение о несовместимости элементов и невозможности их объединения в полную систему.

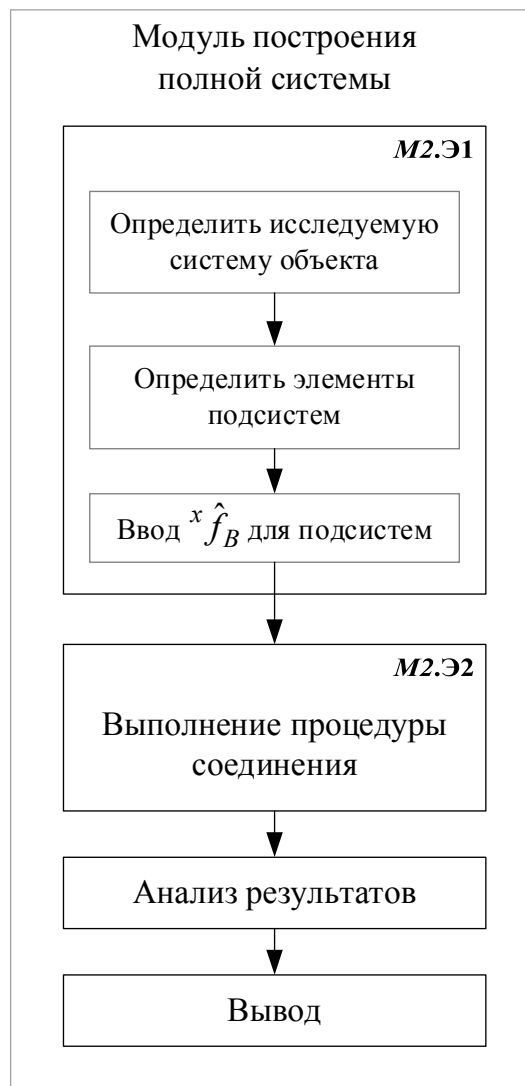


Рисунок 15 – Структурная схема M2

Несовместимость подсистем говорит о том, что их объединение приведет к созданию нестабильной системы, что может спровоцировать ошибки функционирования как подсистем в составе такой системы, так и системы в целом.

2.5.3 Аналитическое описание модуля поиска оптимальных порождающих систем

При построении модели системы исследователь стоит перед выбором из множества свойств наиболее значимых. Такой выбор может быть произведен на основе решения задачи поиска оптимальных порождающих систем. Маска, по которой строится порождающая система, будет обеспечивать оптимальную функцию поведения. Программный модуль (*МЗ*), проектирование которого будет рассмотрено, позволяет решить поставленную задачу [169]. На первом этапе работы модуля поиска оптимальных порождающих систем (*МЗ.Э1*) исследователь определяет границы системы, параметры наибольшей допустимой маски и систему данных. Так как в общем случае систему можно охарактеризовать векторами внешних, внутренних и выходных параметров [170], то выделение границ системы подразумевает определение набора входящих в нее переменных. Кроме того, для направленных систем необходимо указать какие переменные являются входными. Для вычисления порождающей нечеткости направленных систем необходимо указать имеется исчерпывающая информация о входных переменных или нет (или же она несущественна, в частности, когда их состояния контролируются пользователем). Также требуется определить наибольшую допустимую маску.

К параметрам наибольшей допустимой маски относятся:

- а) глубина маски, ΔM ;
- б) уровень сложности – число используемых выборочных переменных, $|M|$;
- в) направление движения маски.

Для удобства работы с табличными данными маска была транспонирована (41). Число всевозможных масок вычисляется по формуле (21) и зависит от числа переменных в составе системы данных и глубины маски. При определении параметров наибольшей допустимой маски стоит учитывать, что большая глубина маски нежелательна. Необходимо также иметь в виду, что, чем

сложнее маска, тем меньше порождающая нечеткость, но при этом увеличивается отрыв от эмпирической основы данных и объем вычислительной обработки. Указание уровня сложности для наибольшей допустимой маски позволяет контролировать объем вычислений, однако может привести к искажению исходной задачи, то есть нахождению не самых оптимальных порождающих систем, а оптимальных лишь в рамках введенных ограничений. Исследователь также может указать конкретную маску (рисунок 16), самостоятельно выбрав расположение выборочных переменных для нахождения порождающих систем и соответствующих им порождающих нечеткостей.

	v1	v2	v3	v4	v5
p=-2	s1		s6		
-1	s2		s7		s10
0	s3	s4	s8	s9	s11
1		s5			s12

Рисунок 16 – Визуализация маски:

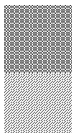

s_1, \dots, s_{12} – выборочные переменные

На втором этапе (МЗ.Э2) производится: генерация содержательных масок на основе заданной наибольшей допустимой маски с разграничением их по сложности; формирование порождающих систем на основе масок; вычисление соответствующих значений порождающей нечеткости. Так, определяется функция поведения для загруженной в программу системы данных, на базе которой будут формироваться порождающие системы. Движение маски возможно в двух направлениях: в сторону возрастания значения параметра (базы) (например, если база – это время, то в направлении увеличения временного параметра) и в сторону убывания значения параметра.

При движении по нейтральным системам маска делится на две подмаски: порождающую и порождаемую (рисунок 17).

w	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
1	s1	...	s6	...	...
2	s2	...	s7	...	s10
3	s3	s4	s8	s9	s11
4	...	s5	...	...	s12
...
t	...	...	...	...	...

Рисунок 17 – Схема подмасок, при движении маски в направлении возрастания параметра, для нейтральной системы, содержащей пять базовых переменных:

 – M_g , порождаемая подмаска;
 – $M_{\bar{g}}$, порождающая подмаска.

Определим множества переменных, соответствующих представленной маске:

$c = \{s_1, \dots, s_{12}\}$ – множество выборочных переменных;




$g = \{s_3, s_5, s_8, s_9, s_{12}\}$ – множество выборочных переменных с порождаемыми состояниями;

$\bar{g} = \{s_1, s_2, s_4, s_6, s_7, s_{10}, s_{11}\}$ – множество порождающих выборочных переменных.

Для направленной системы маска состоит из следующих подмасок: входную; выходную порождаемую; выходную порождающую (рисунок 18).

w	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
1	s1	...	s6	...	...
2	s2	...	s7	...	s10
3	s3	s4	s8	s9	s11
4	...	s5	...	...	s12
...
t	...	...	...	...	...

Рисунок 18 – Схема подмасок, при движении маски в направлении возрастания параметра, в случае, если v_1, v_2 – входные переменные:

 – M_e , входная подмаска;
 – M_g , порождаемая подмаска;
 – $M_{\bar{g}}$, порождающая подмаска.

} $M_{\bar{e}}$ – выходная подмаска.

Определим множества переменных, соответствующих представленной маске:

$e = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$ – множество входных выборочных переменных;

$\bar{e} = \{s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}\}$ – множество выходных выборочных переменных.

Множество \bar{e} подразделяются на:

$g = \{s_8, s_9, s_{12}\}$ – подмножество выборочных переменных с порождаемыми состояниями;

$\bar{g} = \{s_6, s_7, s_{10}, s_{11}\}$ – подмножество порождающих выборочных переменных.

После определения содержательных подмасок и формирования порождающих систем вычисляется порождающая нечеткость (рисунок 19).

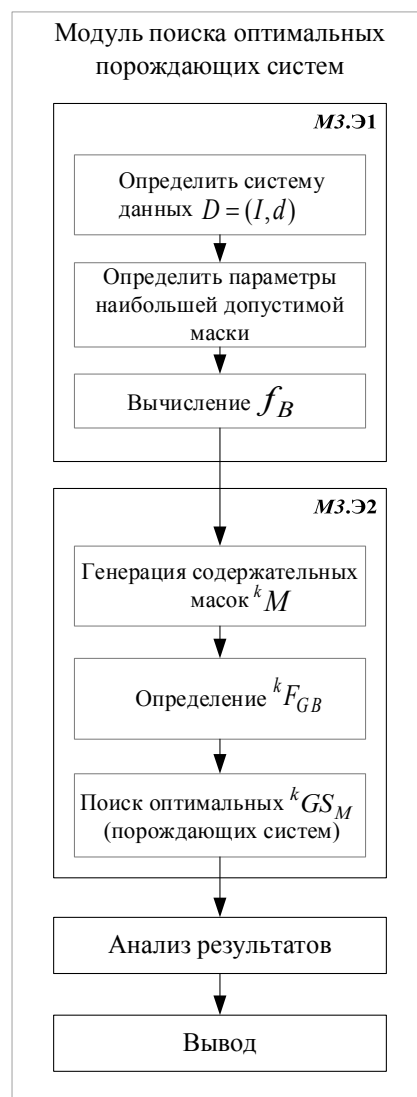


Рисунок 19 – Структурная схема МЗ

Выбор производится в пользу тех порождающих систем, которым соответствует наименьшая порождающая нечеткость. Из математического

обеспечения программного модуля следует, что значение порождающей нечеткости зависит, в том числе, и от направления движения маски.

В результате выполнения *МЗ.Э2* формируется список, включающий: маски, на основе которых строятся порождающие системы, содержащие наибольшее количество информации о системе-оригинале, соответствующие им значениями уровня сложности и порождающей нечеткости. Применение методов эпистемологического уровня порождающих систем, математические модели которых основаны на структуре связей, характеризующейся маской, позволяет произвести выбор существенных свойств объекта на основе пространственных связей между переменными и параметрами системы (в том числе входными и выходными), а также получить дополнительную информацию об исследуемой системе.

Глава 3. Экспериментальное исследование инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем

Несмотря на возросшую в последнее время популярность программных продуктов на основе «облачных технологий» и, в связи с этим широкое распространение веб-программирования, приложения для настольных компьютеров (Desktop Application – *DA*) пользуются большим спросом. Связано это прежде всего с тем, что *DA* обладают следующими достоинствами:

- Доступность – работа приложения автономна и не зависит от доступа к сети Интернет и других отказов, свойственных облачным вычислениям [171];

- Графический интерфейс пользователя (Graphical User Interface – *GUI*) – *DA* обладает собственным *GUI*, который не зависит от браузера и обработки в нем происходящих от *GUI* событий (вдобавок к этому он не перегружен строками меню и панелями инструментов самого браузера);

- Библиотека специфических графических элементов (Widget Library – *WL*) – *DA* предоставляет пользователю библиотеку специфических виджетов, обеспечивающих удобство решения поставленных перед ним задач.

Для разработки программного обеспечения используют интегрированные среды разработки (Integrated Development Environment – *IDE*). *IDE*, поддерживающие объектно-ориентированное программирование, обеспечивают возможность объектно-ориентированного анализа и проектирования сложных систем, что можно обозначить как относительно новое направление в системологии [172, 173]. Реализация инструментальных средств проводилась в современной *IDE* – Qt Creator, которая поддерживает разработку на C++ и включает широкий набор визуальных средств для реализации *GUI* [174]. Фреймворк Qt включает базовые классы для разработки прикладного программного обеспечения, начиная с классов, реализующих элементы графического интерфейса (*WL* Qt представлена библиотекой QtWidgets) и заканчивая дополнительными программными модулями для работы с базами данных, сетевыми протоколами, XML и другими форматами. Qt является

полностью объектно-ориентированным и легко расширяемым. Отличительной особенностью данного фреймворка является использование предварительной системы обработки исходного кода – Meta Object Compiler (*МОС*). Работа в Qt осуществляется не напрямую с языком C++, а с его специфическим «диалектом», с которого *МОС* осуществляет преобразование. Такое преобразование делает возможным дальнейшую компиляцию программного кода любым стандартным C++ компилятором. *МОС* во много раз увеличивает функциональность библиотек при помощи реализации механизма слотов и сигналов. Работа утилиты *МОС* заключается в: обнаружении непосредственно в заголовочных файлах C++ таких классов, описание которых включает макрос `Q_OBJECT`; создании вспомогательного исходного файла C++ и наполнении его метаобъектным кодом. Метаобъектный компилятор позволяет освободить исходный код, созданный с применением Qt, от внутренних служебных конструкций, и сделать его более лаконичным. Qt обеспечивает поддержку большого числа операционных систем: Microsoft Windows, Mac OS X, Linux (в том числе Astar Linux), OpenBSD, HP-UX, FreeBSD и другие. Изначально приложения, написанные с использованием Qt, могут быть разработаны для одной платформы, а затем легко перенесены на другую путем перекомпиляции без изменения исходного кода (поддерживаемые компиляторы: GCC, Clang, MinGW, MSVC, Linux ICC, GCCE, RVCT, WINSCW).

3.1 Исследование программной реализации инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем и их особенности

Алгоритмическое и программное обеспечение разработанных инструментальных средств является неотъемлемой частью любого программного комплекса – алгоритмы решения системных задач и основных процедур, с ними связанных, реализуются в различных программных блоках (подпрограммах, функциях), подключаемых из центрального блока, и включающих описание главных окон трех модулей (*M1*, *M2*, *M3*), составляющих инструментальные

средства для поддержки принятия решений. Работа *MI* начинается с определения исходной системы (рисунок 20).

The screenshot shows a software window titled "Определение исходной системы" (Initial System Definition). It contains two main panels: "Свойства" (Properties) and "Базы" (Bases).
 In the "Свойства" panel, the "Номер свойства" (Property number) is 1, and the "Название" (Name) is "время_посадки". The "Канал наблюдения" (Observation channel) is "чёткий" (clear), "Тип свойства" (Property type) is "нейтральное" (neutral), and "Тип проявлений" (Type of manifestations) is "качественные" (qualitative). The "Математические свойства" (Mathematical properties) section includes "Упорядоченность" (Ordering) set to "линейная" (linear), "Непрерывность" (Continuity) set to "дискретное" (discrete), and "Расстояние" (Distance) set to "не задано" (not specified). A "Сбросить" (Reset) button is present.
 In the "Базы" panel, the "Номер базы" (Base number) is 1, and the "Название" (Name) is "номер_наблюдения". The "Канал наблюдения" (Observation channel) is "чёткий" (clear) and the "Тип базы" (Base type) is "время" (time). The "Математические свойства" (Mathematical properties) section includes "Упорядоченность" (Ordering) set to "линейная" (linear), "Непрерывность" (Continuity) set to "дискретное" (discrete), and "Расстояние" (Distance) set to "определено" (defined). A "Сбросить" (Reset) button is present.
 Navigation buttons include "Сохранить свойство" (Save property), "Сохранить базу" (Save base), "Сохранить систему объекта" (Save system object), "Предыдущее свойство" (Previous property), "Следующее свойство" (Next property), "Предыдущая база" (Previous base), "Следующая база" (Next base), and "Далее" (Next).

Рисунок 20 – Снимок окна определение параметров исходной системы модуля *MI*

Однако исследователь может работать с *MI* определив непосредственно значения функции поведения для системы данных. При помощи главного окна – расположенных на нем строки меню и панели инструментов – в *MI* реализуется алгоритм поиска глубинных связей (рисунок 21, рисунок 22).

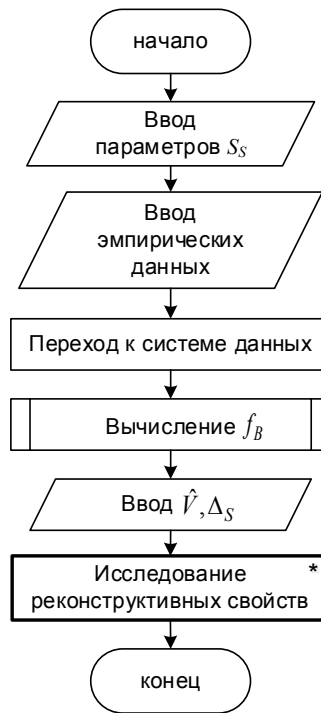
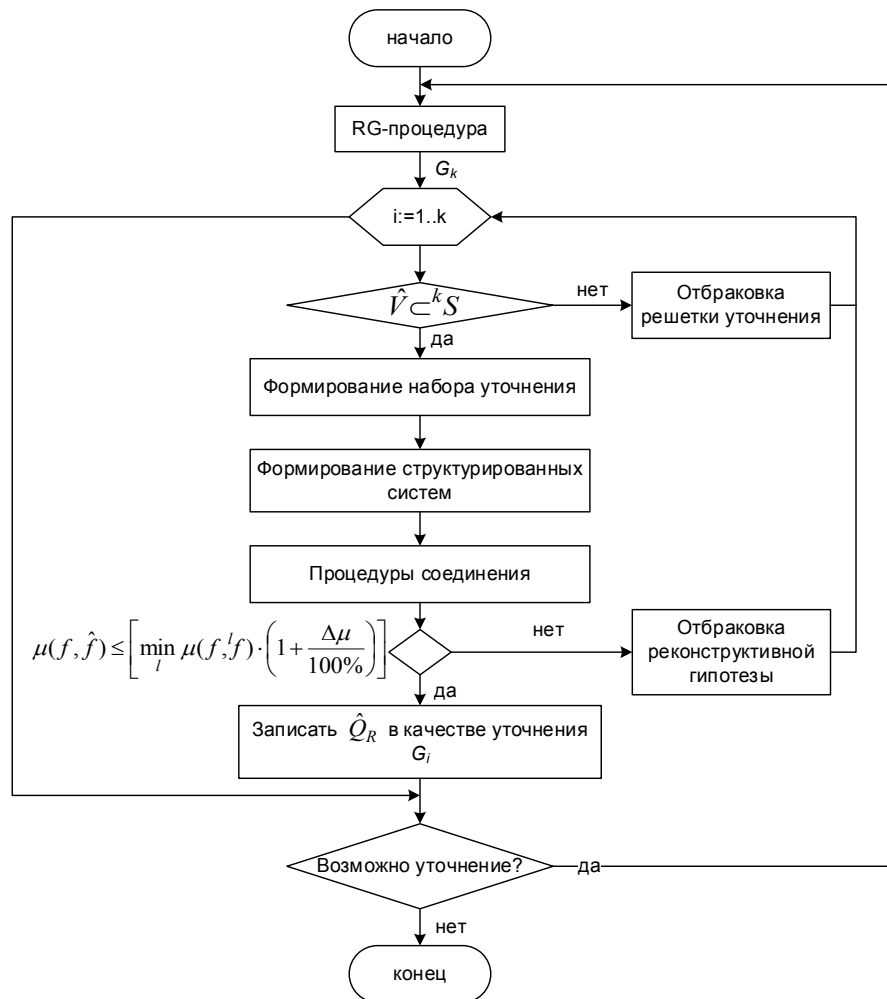
Рисунок 21 – Блок-схема алгоритма работы модуля *MI*

Рисунок 22 – Блок-схема алгоритма исследования реконструктивных свойств

Фреймворк Qt позволяет создавать классы с требуемым набором свойств и функций, динамически создавать и наполнять графическими элементами программные окна (например, таблица реконструктивных гипотез и таблица соответствующих информационных расстояний), запрограммировать динамическое создание виджетов и файлов (например, .rtf и .csv), обрабатывать их содержимое. Архитектура модель/представление дает возможность программной разработки табличных моделей и необходимого набора их свойств и функций [175, 176]. На базе абстрактного класса QAbstractTableModel реализован класс табличной модели TableModel, предназначенный для экономии оперативной памяти. Переопределены методы: headerData (задает заголовки строк и столбцов модели данных); rowCount, columnCount (возвращает количество строк и столбцов); data (определение данных, которые соответствуют в модели индексу и роли). Определены собственные методы: setColumnCount(), setRowCount(), setColumnName(), removeRow(), horizontalHeaderItem(), addColumn(), setItem(), item(), clear(), дополняющие возможности модели. Таким образом, вместо стандартных табличных виджетов, потребляющих достаточно много оперативной памяти, в программе используются представления, которые отвечают за то, как отображаются данные. Так, во время отображения большого набора данных видима только ограниченная область этого набора (видимая часть таблицы) и при использовании созданных табличных моделей представлением запрашиваются только эти данные. Кроме того, одна и та же модель может быть использована в различных представлениях, что имеет существенное значение, так как подсистемы (программные таблицы) в различных наборах могут повторяться. При такой схеме отображения данные могут храниться в Qt-контейнерах или внешних файлах. Фрагмент программной реализации, представляющий собой программную функцию базовой процедуры соединения, содержит использование созданных классов с применением указанных разработок и приведен в Приложении Б. Стандартная библиотека C++ включает библиотеку шаблонов (STL – Standard Template Library), позволяющую использовать множество типов контейнеров [177]. Фреймворк Qt оснащен собственными классами-

контейнерами, поэтому в программе задействованы как Qt-контейнеры (`QVector<T>`, `QList<T>`, `QMap<K, T>` и другие), так и STL-контейнеры. Преимуществом первых является обеспечение не только идентичной работы на различных платформах, но и оптимизации исходного кода в виде неявного совместного использования данных. Обобщенные алгоритмы, выполняемые над произвольными контейнерами (реализуемые такими функциями, как: `qSort()`, `qBinaryFind()` и другими) аналогичны алгоритмам, предлагаемым STL.

Переходным этапом от проектирования к программной реализации математических моделей и методов является концептуализация систем исследуемых эпистемологических уровней. Разработка структурных схем создаваемых программных модулей позволяет осуществить формализацию входных и выходных данных. Определение полного очертания системы и установление места в общем решении применяемых математических методов позволяют реализовать компьютерные алгоритмы на базе разработанных структурных схем. Созданные программные алгоритмы представляют собой последовательность действий над входными данными, они отражают специфические этапы, оказывающие существенное влияние на реализацию заложенных математических методов в рамках программного комплекса, описание процедур решения системных задач на каждом этапе, непосредственно определяющее вычислительный процесс с участием элементов из множества входных данных, который приводит к получению систем решения (терминальных систем).

Главное окно модуля *MI* после выполнения процесса поиска содержит представления, отображающие модели данных, хранящихся в Qt-контейнерах и представляющие системы с функциями поведения (рисунок 23).

Модуль поиска глубинных связей

Файл Инструменты Навигация Параметры Вывод Справка

Степень уточнения 1 (Структурированная система) Степень уточнения 2 Степень уточнения 3 Степень уточнения 4 Степень уточнения 5 Степень уточнения 6

Набор подсистем № 1

v1	v2	v3	f
1	0	0	0.041641880
2	0	0	0.041641880
3	0	1	0.054729328
4	0	1	0.047590720
5	0	2	0.033908388
6	0	2	0.018441404
7	1	0	0.060083284
8	1	0	0.099345628
9	1	1	0.070196312
10	1	1	0.106484236

v1	v2	v4	f
1	0	0	0.020820940
2	0	0	0.023795360
3	0	0	0.038667460
4	0	1	0.030339084
5	0	1	0.026769780
6	0	1	0.045211184
7	0	2	0.007733492
8	0	2	0.009518144
9	0	2	0.035098156
10	1	0	0.082688876

v1	v3	v4	f
1	0	0	0.038667460
2	0	0	0.032123736
3	0	0	0.059488400
4	0	1	0.020226056
5	0	1	0.027959548
6	0	1	0.059488400
7	1	0	0.077334920
8	1	0	0.045211184
9	1	0	0.066032124
10	1	1	0.083878644

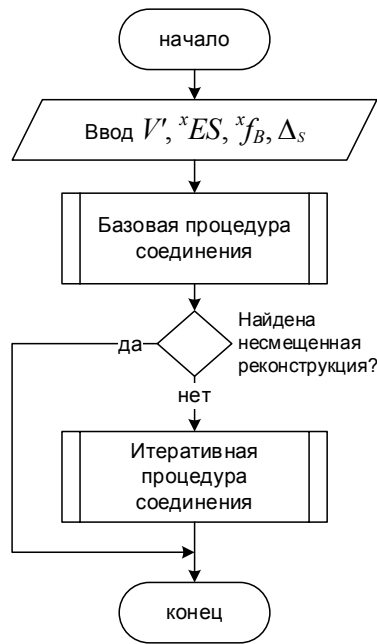
v2	v3	v4	f
1	0	0	0.067221892
2	0	0	0.035098156
3	0	0	0.036882808
4	0	1	0.100535396
5	0	1	0.066032124
6	0	1	0.067221892
7	1	0	0.059488400
8	1	0	0.046400952
9	1	0	0.060083284
10	1	1	0.063057704

v1	v2	v3	v4	(2F*1f)	(3F*(2F*1f))	(4F*(3F*(2F*1f)))	i = 8
1	0	0	0	0.010410470	0.012719673	0.012447627	0.012953484
2	0	0	0	0.011897680	0.011802949	0.011373587	0.011662699
3	0	0	0	0.019333730	0.017360365	0.016868326	0.017024452
4	0	0	1	0.010410470	0.007728216	0.007906877	0.007864288
5	0	0	1	0.011897680	0.012008414	0.012198092	0.012131549
6	0	0	1	0.019333730	0.021813259	0.021974346	0.021645173
7	0	1	0	0.016227882	0.019827477	0.019673952	0.019479592
8	0	1	0	0.014318720	0.014204713	0.014648583	0.014263689
9	0	1	0	0.024182726	0.021714431	0.021443550	0.020995038
10	0	1	1	0.014111202	0.010475456	0.010601755	0.010856073
11	0	1	1	0.012451061	0.012566945	0.012307723	0.012506053
12	0	1	1	0.021028458	0.023725334	0.023700740	0.024218159

Данная вкладка содержит набор подсистем № 1 степени уточнения 2 и их несмещённую реконструкцию

Рисунок 23 – Снимок главного окна модуля *M1*

M2 реализует алгоритм построения полной системы (рисунок 24), в процессе выполнения которого подсистемы объединяются при помощи процедур соединения. Итеративная процедура использует ограничение на тысячу итераций, если соединение не выполнено в меньшее количество итераций, подсистемы несовместимы. Визуально подсистемы, определенные пользователем, разбиваются на пары (в соответствии с заложенными в программу численными алгоритмами процедур соединения) и размещаются в отдельных вкладках (рисунок 25). Полная система состоит из переменных всех подсистем и полученной результирующей функции поведения. В главном окне *M2* отображаются результаты вычислений.

Рисунок 24 – Блок-схема обобщенного алгоритма работы *M2*

Подсистема 1 и 2				Подсистема 3			
v1	v2	f1		v2	v3	f2	
1	0	0	0.1	1	0	0	0.15
2	0	1	0.2	2	0	1	0.3
3	1	0	0.3	3	1	0	0.15
4	1	1	0.4	4	1	1	0.4

	v1	v2	v3	(2f*1f)	(3f*(2f*1f))	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6
1	0	0	0	0.05000000	0.10769231	0.06976744	0.03597707	0.08589239	0.07020507	0.03598234	0.08587131
2	0	0	1	0.10000000	0.04666667	0.03023256	0.08311965	0.03645261	0.02979493	0.08327624	0.03644810
3	0	1	0	0.04285714	0.09230769	0.12676057	0.04779536	0.11410761	0.12845978	0.04782293	0.11412869
4	0	1	1	0.11428571	0.05333333	0.07323943	0.14490149	0.06354739	0.07154022	0.14520272	0.06355190
5	1	0	0	0.15000000	0.31818181	0.22111554	0.11402293	0.26366418	0.22245965	0.11401766	0.26369204
6	1	0	1	0.30000000	0.11351351	0.07888446	0.21688035	0.09190257	0.07754035	0.21672376	0.09192538
7	1	1	0	0.08571429	0.18181819	0.27106227	0.10220464	0.23633582	0.27446342	0.10217707	0.23630796
8	1	1	1	0.22857143	0.08648649	0.12893773	0.25509851	0.10809743	0.12553658	0.25479728	0.10807462

Рисунок 25 – Снимок главного окна модуля *M2*

В реализации алгоритма *M3* также применяются: для обработки системы данных – класс высокоуровневых потоков данных `QTextStream`; для порождающих систем – последовательные и ассоциативные Qt-контейнеры. За выполнение операций ввода-вывода отвечает класс `QIODevice`, который представляет абстракцию устройств чтения и записи блоков байтов.

Данный модуль реализует численный алгоритм генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, созданный в рамках диссертационного исследования. Алгоритмы, выполняемые программным модулем *М3*, представлены на рисунке 26, рисунке 27.

М3 дает возможность осуществлять поиск оптимальных систем при следующих условиях:

- для нейтральных систем;
- для направленных систем с наличием информации о входных переменных;
- для направленных систем при отсутствии информации о входных переменных;
- для заданной системы на определенном пользователем уровне сложности;
- для заданной системы на всех уровнях сложности;
- для заданной системы, осуществляя проход маски по матрице данных в направлении возрастания параметра;
- для заданной системы, осуществляя проход маски по матрице данных в направлении убывания параметра.

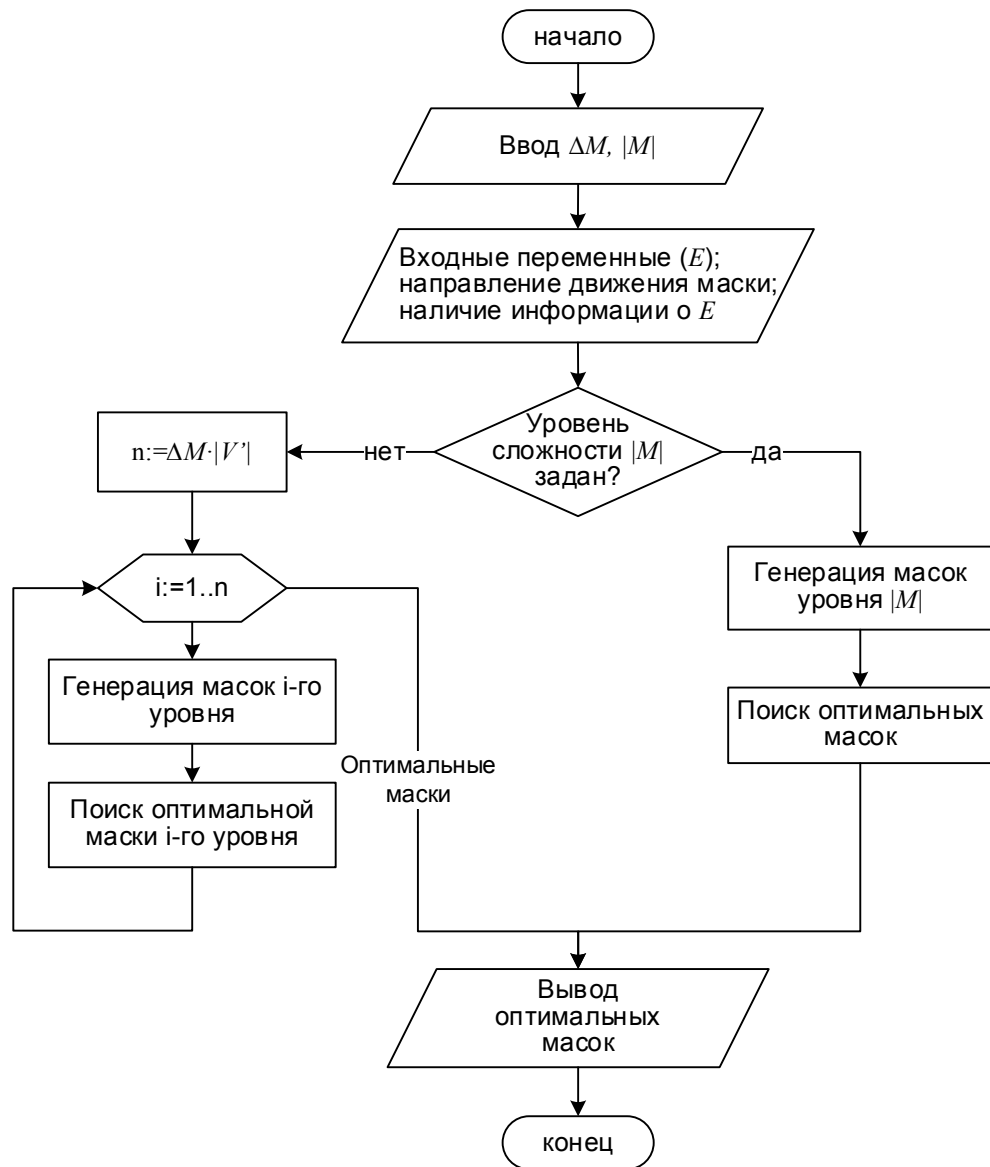


Рисунок 26 – Блок-схема обобщенного алгоритма работы модуля $M3$

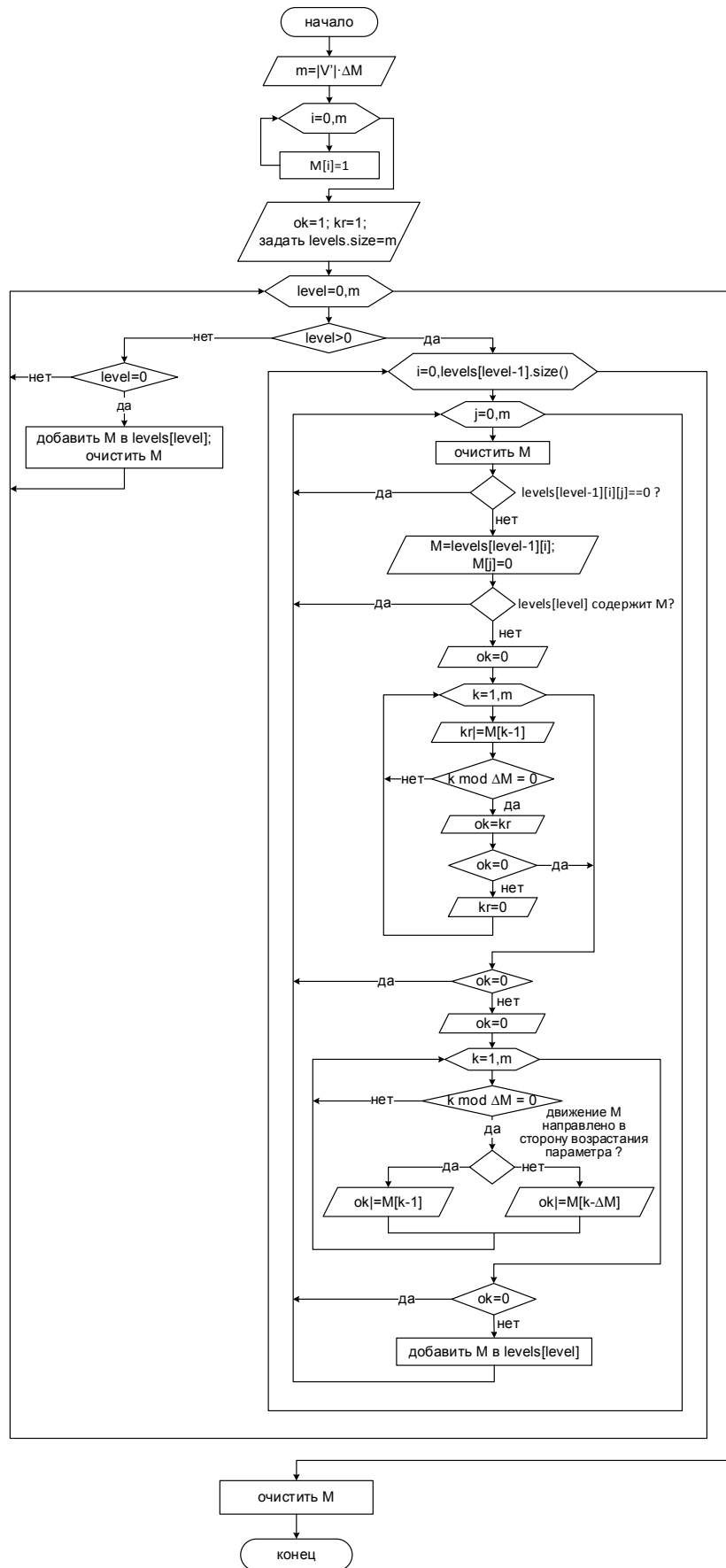


Рисунок 27 – Блок-схема программного алгоритма генерации содержательных масок

Отчет формируется либо по всем сгенерированным порождающим системам, либо только по оптимальным – обладающим минимальной порождающей нечеткостью. Обработка данных и поиск оптимальных систем подразумевает выполнение в автоматическом режиме по указанным параметрам генерации масок (рисунок 28), а также отбраковку несодержательных масок, нахождение порождающих и порождаемых подмасок, вычисление порождающих нечеткостей, а также вывод.

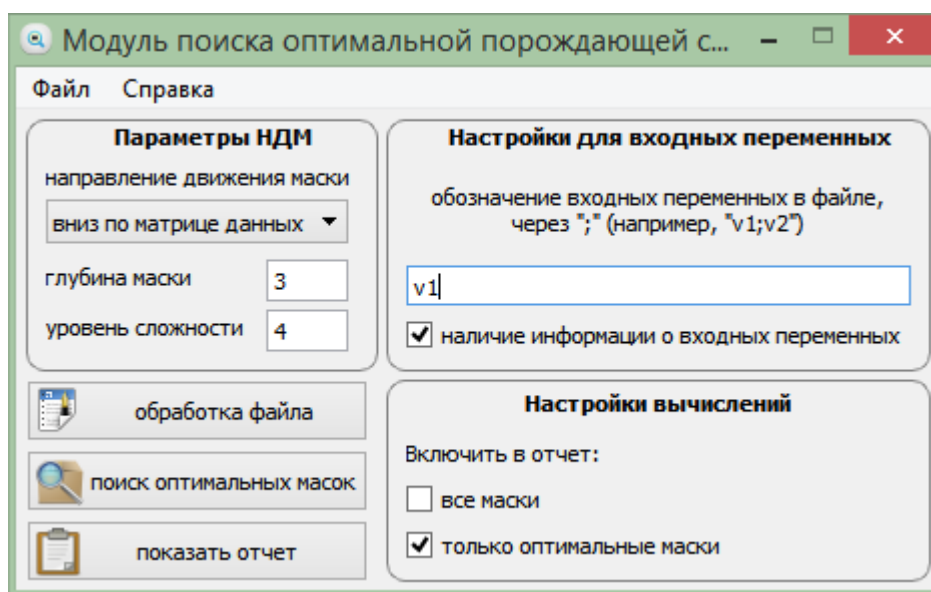


Рисунок 28 – Снимок главного окна модуля *МЗ*

На базе полученных научных результатов спроектирован и разработан комплекс программ для: обработки эмпирических данных; поиска глубинных связей между элементами слабоформализованных систем; выбора значимых свойств системы; декомпозиции систем на подсистемы различного уровня сложности с допустимым отличием по информационному расстоянию относительно исходной системы; объединения подсистем в согласованную полную систему.

Программный комплекс, реализующий процедуру перехода от *КПС* к *ОПС*, процедуры соединения, *RG*-процедуру, вычисление и оценку информационных расстояний и порождающей нечеткости, разработанные математические модели, численный алгоритм и метод, осуществляет реконструктивный анализ систем,

исследование систем на основе пространственных структур связей между их элементами и решение других задач системологии, и может использоваться в разработке программных продуктов с иной конфигурацией, произвольным набором решаемых задач, а также при программной реализации систем и методов вышестоящих эпистемологических уровней.

Характеристики комплекса программ.

Программная разработка инструментальных средств осуществлялась на ПК класса IBM PC, *IDE* разработки Qt Creator 3.5.1. Комплекс программ способен работать в операционных системах Windows XP / Vista / 7 / 8 / 8.1 / 10, а также Mac OS / Linux. Инструментальное средство рассчитано на пользователей, знакомых с основными понятиями системологии, и применение для принятия оптимальных решений в области неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой, в частности систем, состоящих из сложно устроенных подсистем, находящихся в непрерывном динамическом взаимодействии, природа которого неизвестна. В Приложении В приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, которые входят в состав программного комплекса. Разработанный комплекс является открытой системой – может быть расширен дополнительными программными модулями и допускает его включение в другие более сложные программные системы.

3.2 Апробирование инструментальных средств для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных систем

Модуль поиска глубинных связей (*MI*) представляет собой программу, графический интерфейс которой оснащен строкой меню, строкой состояния, панелью инструментов. Работа модуля *MI* начинается с определения исходной системы (рисунок 29). Для создания нового объекта необходимо задать имя объекта, его краткое описание, количество свойств и баз. Если исходная система объекта ранее уже была определена, она может быть загружена из базы данных или, при необходимости, удалена из нее. Рассмотрим исходную систему для исследования взаимосвязи показателей компонентов крови и вида заболевания.

Свойствами объекта выступают вид заболевания и компоненты крови, отраженные в гемограммах. Для добавления свойства указываются его название, параметры, математические свойства, после чего необходимо нажать кнопку «Сохранить свойство». Аналогично для баз. Название свойств и баз соответствует заголовкам таблиц в файле, содержащем данные (в рассматриваемом случае файл, содержит показатели компонентов крови и вида заболевания).

Экспериментальное исследование модуля *MI* для задачи анализа гемограмм и информации о виде заболевания проводилось на основе данных из гемограмм больных хроническим лимфолейкозом (ХЛЛ) и эритремией, предоставленных ГБУЗ «Клинический онкологический диспансер №1» министерства здравоохранения Краснодарского края в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» и ГБУЗ «Клинический онкологический диспансер №1» МЗ КК. Гемограммы исследуемой группы больных содержали данные о десяти компонентах крови, при этом данные о MPV (среднем объеме тромбоцита), СОЭ (скорости оседания эритроцитов) и лимфоцитах фактически не были в них представлены, эти компоненты крови из рассмотрения были исключены.

Определение исходной системы

Создание нового объекта

Имя объекта: Object Краткое описание объекта: Гемограмма

Количество свойств: 8 Количество баз: 1 Создать объект

Загрузка ранее созданного объекта

Имя объекта: Object Загрузить БД объекта Удалить БД объекта

Система объекта Конкретная представляющая система Система данных

Свойства

Номер свойства: 1

Название: Заблевание

Канал наблюдения: четный

Тип свойства: нейтральное

Тип проявлений: качественные

Для структурированных систем: нецелевое

Сохранить свойство

Математические свойства

Упорядоченность: не задано

Непрерывность: не задано

Расстояние: не задано

Сбросить

← Предыдущее свойство Следующее свойство →

Базы

Номер базы: 1

Название: дата сдачи анализа крои

Канал наблюдения: четный

Тип базы: время

Сохранить базу

Математические свойства

Упорядоченность: не задано

Непрерывность: не задано

Расстояние: не задано

Сбросить

← Предыдущая база Следующая база →

Сохранить систему объекта Далее

Рисунок 29 – Снимок окна задания параметров исходной системы

Таким образом, модель системы объекта определим следующим образом:

$$O = (\{(a_i, A_i) | i \in N_8\}, \{b_1, B_1\}), \quad (44)$$

где a_1 – заболевание, a_2 – RBC (эритроциты), a_3 – MCV (средний объем эритроцита), a_4 – PLT (тромбоциты), a_5 – WBC (лейкоциты), a_6 – HGB (гемоглобин), a_7 – MCH (среднее содержание гемоглобина в отдельном эритроците), a_8 – MCHC (средняя концентрация гемоглобина в эритроцитарной массе), b_1 – дата сдачи клинического анализа.

Следующим этапом является определение конкретной представляющей системы (рисунок 30). Каждому свойству системы ставятся в соответствие его конкретные состояния и их проявления. Для перехода к общей представляющей системе было принято следующее множество обобщенных состояний абстрактных переменных:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Заболевание: } \dot{V}_1 = \{\text{ХЛЛ; эритремия}\} \rightarrow V_1 = \{0, 1\}, \\ \text{RBC: } \dot{V}_2 = \{[0, 4]; (4, 5], (5, 6], (6, 7], (7, 2000]\} \rightarrow V_2 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \text{MCV: } \dot{V}_3 = \{[0, 65]; (65, 75], (75, 85], (85, 95], (95, 2000]\} \rightarrow \\ \rightarrow V_3 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \text{PLT: } \dot{V}_4 = \{[0, 100]; (100, 200], (200, 300], (300, 400], (400, 2000]\} \rightarrow \\ \rightarrow V_4 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \text{WBC: } \dot{V}_5 = \{[0, 5]; (5, 10], (10, 15], (15, 20], (20, 2000]\} \rightarrow \\ \rightarrow V_5 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \text{HGB: } \dot{V}_6 = \{[0, 12]; (12, 14], (14, 16], (16, 18], (18, 2000]\} \rightarrow \\ \rightarrow V_6 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \text{MCH: } \dot{V}_7 = \{[0, 10]; (10, 20], (20, 30], (30, 40], (40, 2000]\} \\ \rightarrow V_7 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \text{MCHC: } \dot{V}_8 = \{[0, 200]; (200, 250], (250, 300], (300, 350], (350, 2000]\} \rightarrow \\ \rightarrow V_8 = \{0, 1, 2, 3, 4\}. \end{array} \right.$$

Для количественных свойств в программном комплексе доступен ввод диапазона значений, для качественных – ввод конкретных проявлений (например, состояние №1 свойства «Заболевание» характеризуется качественными проявлениями, такими как: «ХЛЛ»; «хронический лимфолейкоз»; «хрон.

лимфол.» и другие, все эти проявления соответствуют состоянию «1»). Состояния баз заполняются автоматически после загрузки файла с исходными данными.

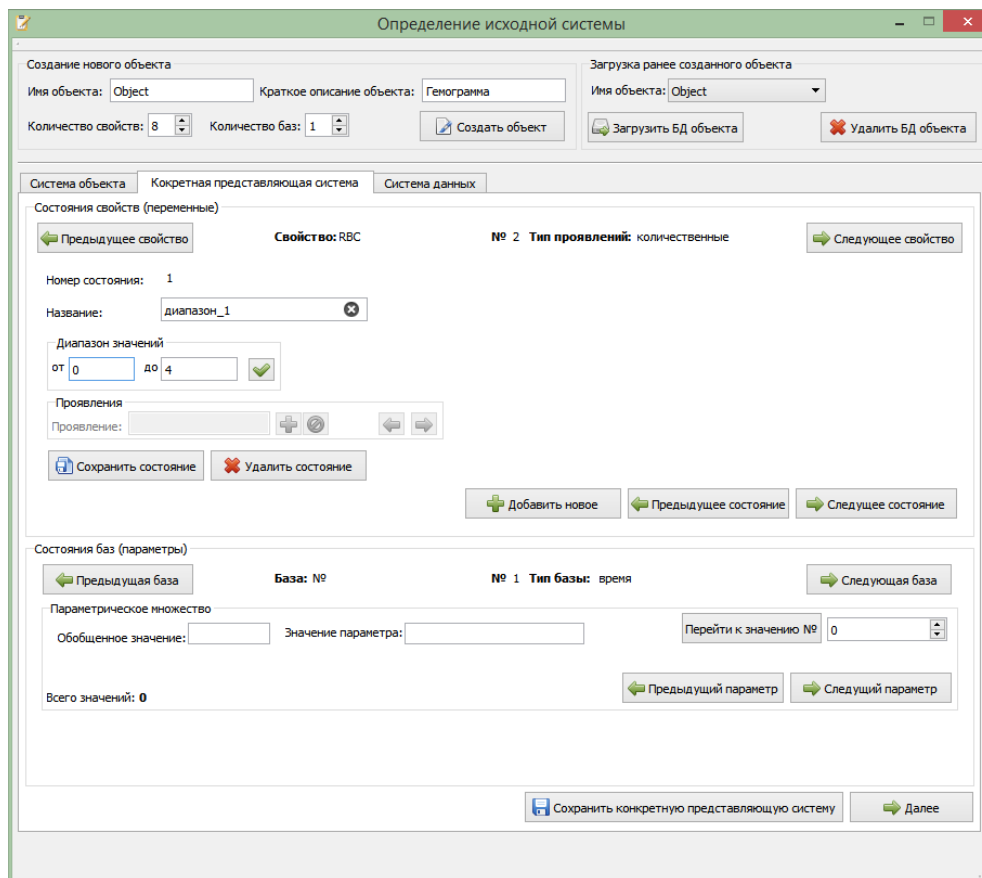


Рисунок 30 – Снимок вкладки «Конкретная представляющая система»

После ввода состояний свойств и их проявлений необходимо нажать кнопку «Сохранить конкретную представляющую систему», для перехода к формированию системы данных нажать кнопку «Далее».

Формирование системы данных на базе заданной информации начинается с загрузки данных из файла, после нажатия на соответствующую кнопку, расположенную на вкладке «Система данных», появится сообщение с выбором (рисунок 31). Пустые строки могут быть учтены, тогда будет использована система данных с неполной информацией о некоторых свойствах. Если же требуется, чтобы состояния были одновременно определены для всех свойств, то, после соответствующего выбора в окне настроек обработки файла, строки с пустыми значениями учитываться не будут.

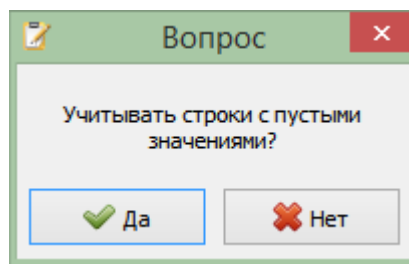


Рисунок 31 – Снимок окна настройки обработки файла

После загрузки файла с данными номера строк, которые не были включены в дальнейшую обработку, отобразятся в информационном окне в левом нижнем углу вкладки «Система данных» (рисунок 32).

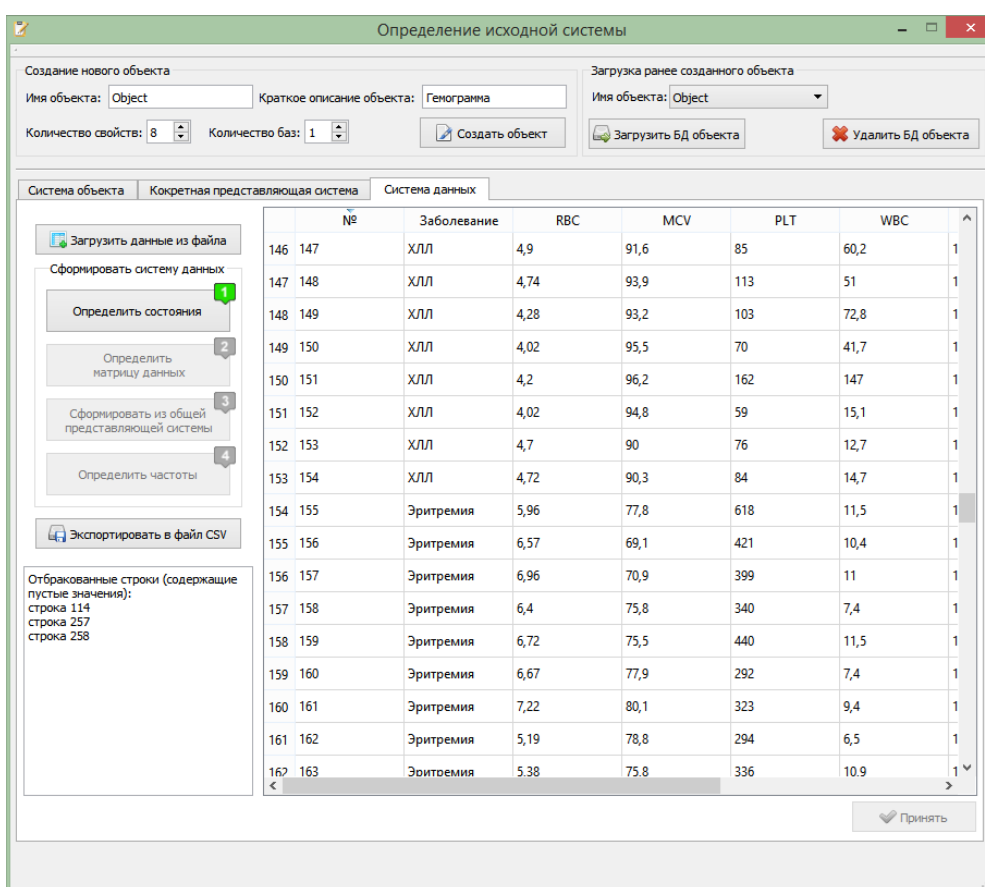


Рисунок 32 – Снимок вкладки «Система данных»

Впоследствии, после загрузки исходного файла становится активна кнопка «Определить состояния», нажатие которой является первым шагом для перехода от общей представляющей системе к системе данных. Определение состояний подразумевает переход от конкретных состояний свойств (их значений) к обобщенным состояниям. При этом состояния, которые были определены

исследователем для перехода от *КПС* к *ОПС*, будут заменены соответствующими обобщенными состоянием, а значения, которые не определены, – символом «*» (рисунок 33).

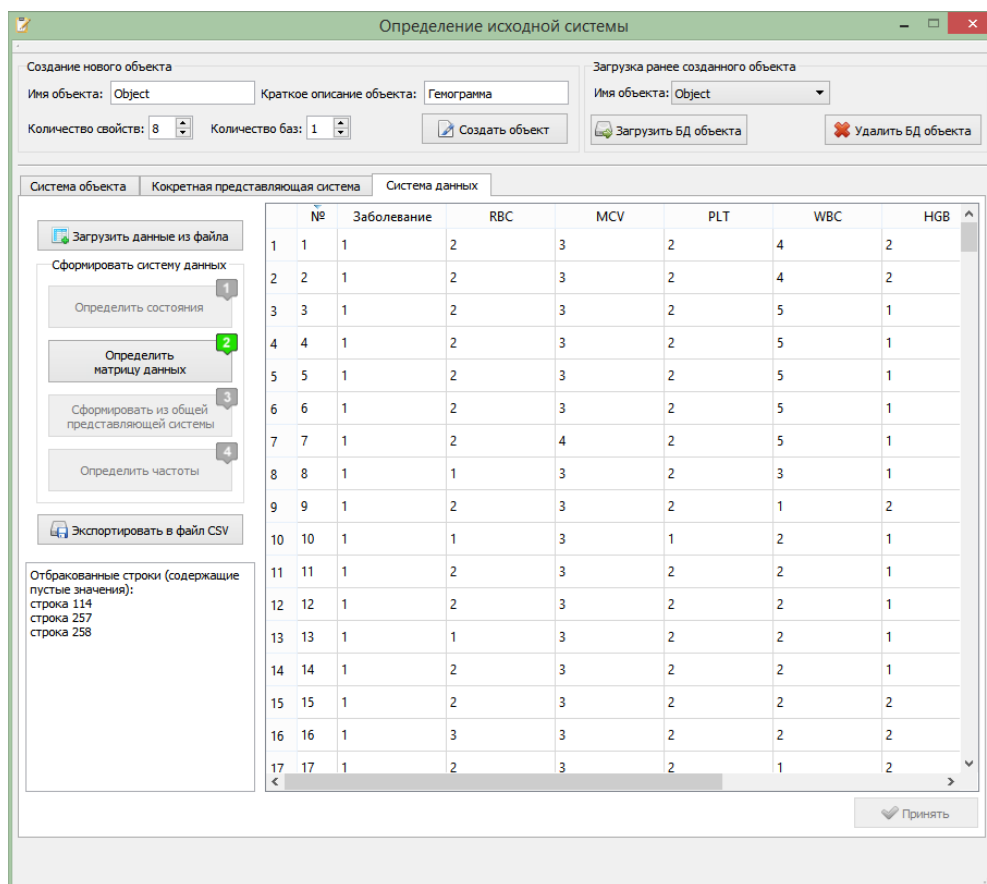


Рисунок 33 – Снимок окна программы с обобщенными состояниями свойств

Функция «Определить матрицу данных» удаляет из рассмотрения строки, включающие неопределенные наборы, состояния в которых были заменены на символ «*». Конечный переход от *ОПС* осуществляется нажатием кнопки «Сформировать из общей представляющей системы», после чего программа осуществляет преобразование полученных данных, в том числе в удобочитаемый вид, реализуя сортировку наборов состояний по возрастанию. Для использования полученной системы в сторонних программах, реализующих методы системологии и для которых требуется определение частот встречаемости, они могут быть вычислены с помощью реализованной функции «Определить частоты».

На любом из этапов формирования системы данных, полученные результаты, могут быть сохранены с помощью кнопки «Экспортировать в файл CSV». Данный формат файла выбран ввиду того, что он успешно обрабатывается практически всеми современными СУБД.

Для выявления взаимосвязей в системе осуществим реконструктивный анализ при помощи модуля поиска глубинных связей. После открытия окна программы область данных пуста. Окно содержит меню со следующими группами команд: «Файл», «Инструменты», «Навигация», «Параметры», «Вывод» и «Справка» (рисунок 34).

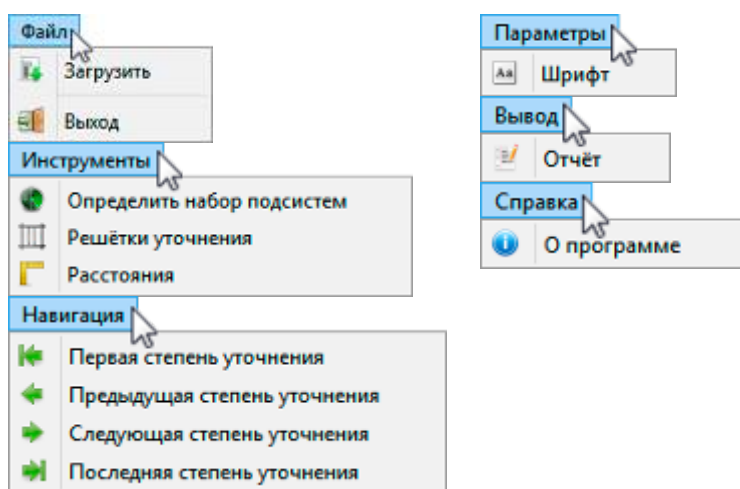


Рисунок 34 – Снимки пунктов меню окна «Поиск глубинных связей»

Для последующей обработки системы данных необходимо выбрать пункт «Загрузить» меню «Файл», после чего отобразится окно выбора содержимого файла (рисунок 35).

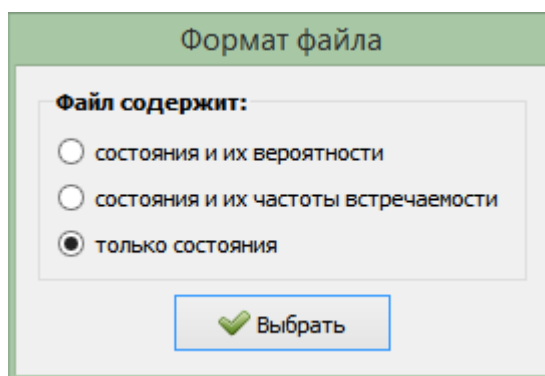


Рисунок 35 – Снимок окна выбора содержимого файла данных

После определения исходной системы для содержащихся в гемограммах показателей система данных содержит только состояния. Поэтому выберем пункт «только состояния». Система из восьми свойств и одной базы была разбита на 35 систем, состоящих из четырех свойств. При загрузке системы данных производится компоновка наборов состояний, вычисление вероятностной функции поведения – вероятностей появления соответствующих наборов состояний. В главном окне отобразится новая вкладка с полученной системой под названием «Степень уточнения 1 (Исходная система)» (рисунок 36). Здесь под исходной системой понимается начальная система базовой системной задачи.

Степень уточнения 1 (Исходная система)					
	v1	v2	v3	v4	f
1	0	0	2	0	0.0034602
2	0	0	2	1	0.0069204
3	0	0	3	2	0.0034602
4	0	0	3	3	0.0034602
5	0	0	4	0	0.0034602
6	0	1	1	1	0.0034602
7	0	1	2	0	0.0207612
8	0	1	2	1	0.0622837
9	0	1	2	2	0.0034602
10	0	1	2	4	0.0034602
11	0	1	3	0	0.1038062
12	0	1	3	1	0.1384083
13	0	1	3	2	0.0034602
14	0	1	3	4	0.0103806
15	0	1	4	0	0.0346021
16	0	1	4	1	0.0138408
17	0	1	4	2	0.0069204
18	0	2	2	0	0.0069204

Рисунок 36 – Снимок окна, содержащего сформированную систему

Полученные для исходной системы (начальной системы) все возможные решетки уточнения (возможные реконструктивные гипотезы) доступны для просмотра и могут быть выведены на экран.

Для дальнейшего осуществления реконструктивного анализа заданной системы, получения информации о глубинных связях между ее элементами и вариантов декомпозиции системы на подсистемы необходимо выбрать пункт «Определить набор подсистем» меню «Инструменты». В появившемся окне

настроек вычислений (рисунок 37) исследователь системы указывает переменные, которые являются целевыми, допустимое отклонение значений информационных расстояний и значение погрешности для реконструктивных гипотез, полученных методом структурированных систем, относительно исходной системы. При выборе опции «показать промежуточные расчеты» будут отображены все вычисления, полученные при выполнении процедуры соединения для различных решеток уточнения.

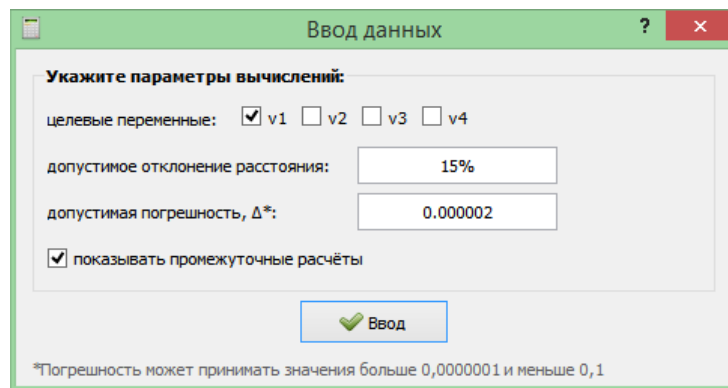


Рисунок 37 – Снимок окна программы для ввода параметров вычислений

При исследовании взаимосвязи показателей компонентов крови и вида заболевания были приняты следующие параметры структурирования: отклонение для информационных расстояний, равное 15%, и погрешность для реконструкции, равная 0,000002. В качестве целевой переменной выступает переменная v1 – заболевание.

Во время выполнения процесса определения подсистем и их реконструктивного анализа выводится информационное сообщение (рисунок 38).

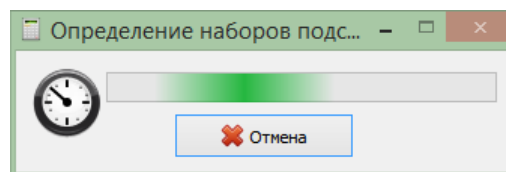
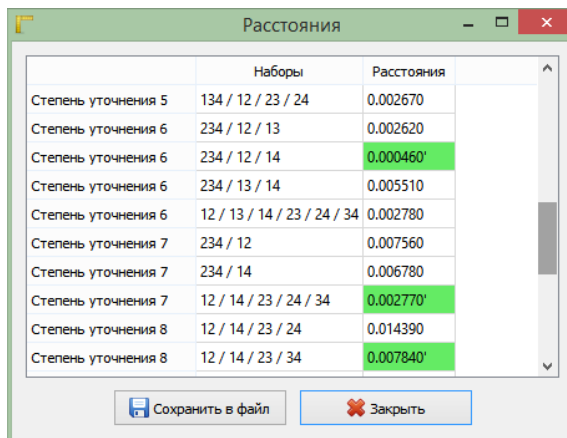


Рисунок 38 – Снимок информационного сообщения о прогрессе процесса вычислений

После выполнения вычислений становится доступен ранее недоступный пункт «Расстояния» меню «Инструменты», выбор которого приводит к

отображению окна, в котором расположена таблица результирующих вариантов декомпозиции системы и их информационные расстояния относительно исходной системы (рисунок 39). Цветом отмечены подсистемы, которые отвечают требованиям исследователя и уточнение которых производилось в процессе реконструктивного анализа системы. Полученные данные, по желанию, могут быть сохранены в файл формата RTF.



	Наборы	Расстояния
Степень уточнения 5	134 / 12 / 23 / 24	0.002670
Степень уточнения 6	234 / 12 / 13	0.002620
Степень уточнения 6	234 / 12 / 14	0.000460
Степень уточнения 6	234 / 13 / 14	0.005510
Степень уточнения 6	12 / 13 / 14 / 23 / 24 / 34	0.002780
Степень уточнения 7	234 / 12	0.007560
Степень уточнения 7	234 / 14	0.006780
Степень уточнения 7	12 / 14 / 23 / 24 / 34	0.002770
Степень уточнения 8	12 / 14 / 23 / 24	0.014390
Степень уточнения 8	12 / 14 / 23 / 34	0.007840

Рисунок 39 – Снимок окна «Расстояния»

Также становятся доступны пункты меню «Навигация», которые позволяют перемещаться по созданным вкладкам. На основе полученных результатов, формируется отчет – пункт «Отчет» меню «Вывод» (рисунок 40).

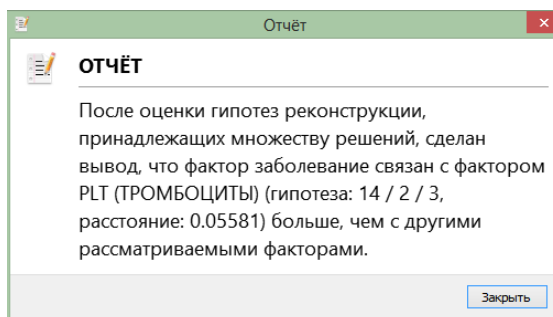


Рисунок 40 – Снимок окна «Отчет»

После завершения вычислений в окне программы (рисунок 41) будут отражены вкладки, соответствующие полученным степеням уточнения, которые содержат результаты численного реконструктивного анализа системы – результаты численной обработки реконструктивных гипотез, соответствующих решеткам уточнения, отвечающим требованиям исследователя.

Поиск глубинных связей

Файл Инструменты Навигация Параметры Вывод Справка

Набор подсистем № 1

v1	v2	v3	f	v1	v2	v4	f	v1	v3	v4	f	v2	v3	v4	f				
1	0	0	2	0.0103806	1	0	0	0	0.0069204	1	0	2	0	0.0311418	1	0	2	0	0.0034602
2	0	0	3	0.0069204	2	0	0	1	0.0069204	2	0	2	1	0.0830449	2	0	2	1	0.0069204
3	0	0	4	0.0034602	3	0	0	2	0.0034602	3	0	3	2	0.0069204	3	0	3	2	0.0034602
4	0	1	1	0.0034602	4	0	0	3	0.0034602	4	0	3	3	0.0034602	4	0	3	3	0.0034602
5	0	1	2	0.0899653	5	0	1	1	0.2179930	5	0	4	0	0.0415225	5	0	4	0	0.0276817
6	0	1	3	0.2560553	6	0	1	0	0.1591695	6	0	1	1	0.0034602	6	1	1	1	0.0034602
7	0	1	4	0.0553633	7	0	1	2	0.0138408	7	0	2	2	0.0034602	7	1	2	0	0.0207612
8	0	2	2	0.0207612	8	0	1	4	0.0138408	8	0	2	4	0.0034602	8	1	2	1	0.0622837
9	0	2	3	0.0761245	9	0	2	0	0.0311418	9	0	3	0	0.1245674	9	1	2	2	0.0034602
10	0	2	4	0.0069204	10	0	2	1	0.0726643	10	0	3	1	0.1937716	10	1	2	4	0.0069204

v1	v2	v3	v4	(2F*1f)	(3F*(2F*1f))	(4F*(3F*(2F*1f)))	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12
1	0	0	2	0	0.0034602	0.0023914	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
2	0	0	2	1	0.0034602	0.0043253	0.0069204	0.0069204	0.0069204	0.0069233	0.0069204	0.0069204	0.0069201	0.0069204	0.0069204	0.0069204	0.0069204	0.0069204
3	0	0	3	2	0.0011534	0.0008057	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034962	0.0034602	0.0034602	0.0034599	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
4	0	0	3	3	0.0011534	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
5	0	0	4	0	0.0011534	0.0019160	0.0019081	0.0034602	0.0034602	0.0034352	0.0034383	0.0034602	0.0034602	0.0034595	0.0034596	0.0034602	0.0034602	0.0034602
6	0	1	1	1	0.0018632	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
7	0	1	2	0	0.0353710	0.0244458	0.0207612	0.0205842	0.0206258	0.0207476	0.0207612	0.0207580	0.0207606	0.0207624	0.0207612	0.0207612	0.0207612	0.0207613
8	0	1	2	1	0.0484429	0.0605536	0.0622837	0.0617528	0.0622084	0.0622340	0.0622837	0.0622742	0.0622853	0.0622828	0.0622837	0.0622838	0.0622839	0.0622837
9	0	1	2	2	0.0030757	0.0034602	0.0034602	0.0034307	0.0033731	0.0034602	0.0034602	0.0034597	0.0034609	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
10	0	1	2	4	0.0030757	0.0034602	0.0042336	0.0041975	0.0037429	0.0034602	0.0034739	0.0034734	0.0034574	0.0034602	0.0034601	0.0034601	0.0034600	0.0034602
11	0	1	3	0	0.1006713	0.1015343	0.1038062	0.1034075	0.1036163	0.1037152	0.1038062	0.1037978	0.1038021	0.1038062	0.1038060	0.1038061	0.1038061	0.1038062
12	0	1	3	1	0.1378759	0.1397573	0.1384083	0.1378767	0.1388940	0.1385833	0.1384083	0.1383797	0.1384044	0.1384088	0.1384083	0.1384080	0.1384083	0.1384083
13	0	1	3	2	0.0087540	0.0061147	0.0034602	0.0034469	0.0033890	0.0034242	0.0034602	0.0034595	0.0034607	0.0034604	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
14	0	1	3	4	0.0087540	0.0103906	0.0113679	0.0113242	0.0100979	0.0103906	0.0104335	0.0104313	0.0103834	0.0103906	0.0103812	0.0103812	0.0103808	0.0103806
15	0	1	4	0	0.0217668	0.0361578	0.0362562	0.0348570	0.0349274	0.0346755	0.0346088	0.0346067	0.0346110	0.0346045	0.0346023	0.0346022	0.0346022	0.0346021
16	0	1	4	1	0.0298110	0.0148826	0.0138408	0.0133067	0.0134049	0.0137430	0.0138408	0.0138400	0.0138425	0.0138407	0.0138408	0.0138408	0.0138408	0.0138408
17	0	1	4	2	0.0018928	0.0069204	0.0074886	0.0071996	0.0070787	0.0069204	0.0069171	0.0069167	0.0069191	0.0069204	0.0069203	0.0069203	0.0069204	0.0069204
18	0	2	2	0	0.0062284	0.0043046	0.0069204	0.0069204	0.0068730	0.0069136	0.0069204	0.0069204	0.0069183	0.0069189	0.0069204	0.0069204	0.0069203	0.0069204
19	0	2	2	1	0.0145328	0.0232525	0.0138408	0.0138408	0.0138819	0.0138876	0.0138408	0.0138408	0.0138426	0.0138420	0.0138408	0.0138408	0.0138409	0.0138409
20	0	2	3	0	0.0228373	0.0230331	0.0210579	0.0209761	0.0208323	0.0208522	0.0207742	0.0207707	0.0207644	0.0207653	0.0207618	0.0207616	0.0207613	0.0207612
21	0	2	3	1	0.0532872	0.0540143	0.0553633	0.0551484	0.0553120	0.0551883	0.0553633	0.0553538	0.0553610	0.0553628	0.0553633	0.0553629	0.0553632	0.0553633
22	0	2	4	0	0.0020761	0.0034487	0.0034602	0.0034602	0.0034365	0.0034117	0.0034602	0.0034602	0.0034591	0.0034585	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
23	0	2	4	1	0.0048443	0.0024184	0.0034602	0.0034602	0.0034705	0.0035580	0.0034602	0.0034602	0.0034607	0.0034603	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
24	1	0	4	0	0.0242215	0.0258805	0.0257736	0.0247638	0.0242215	0.0242215	0.0242434	0.0242295	0.0242215	0.0242215	0.0242215	0.0242217	0.0242215	0.0242215
25	1	0	4	1	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0033246	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034582	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034601	0.0034602	0.0034602
26	1	0	4	3	0.0103806	0.0138455	0.0103806	0.0099739	0.0103806	0.0103546	0.0103806	0.0103746	0.0103806	0.0103820	0.0103806	0.0103804	0.0103806	0.0103806
27	1	1	0	4	0.0023068	0.0035044	0.0034602	0.0034602	0.0034276	0.0034299	0.0034602	0.0034602	0.0034604	0.0034604	0.0034602	0.0034602	0.0034602	0.0034602
28	1	1	2	4	0.0023068	0.0021960	0.0026868	0.0034602	0.0034276	0.0034329	0.0034465	0.0034602	0.0034604	0.0034605	0.0034603	0.0034602	0.0034602	0.0034602
29	1	1	3	3	0.0127761	0.0074680	0.0069204	0.0070319	0.0068253	0.0068773	0.0069204	0.0069263	0.0069245	0.0069213	0.0069204	0.0069205	0.0069205	0.0069204

Данная вкладка содержит набор подсистем № 1 степени уточнения 2 и их несмещённую реконструкцию

Рисунок 41 – Снимок окна «Поиск глубинных связей» с результатами расчетов

В результате вычислительного эксперимента, проведенного посредством программы, реализующей модифицированный численный метод структурированных систем, получены реконструктивные гипотезы для исследуемой системы, количество которых варьируется от 25 до 45 и зависит от эмпирических данных, а также получена информация о взаимосвязи элементов в них (таблица 5).

Таблица 5 – Результат реконструктивного анализа для исходных систем

№ системы	Число реконструктивных гипотез	V1	V2	V3	V4	Влияние на заболевание
1	38	заболевание	RBC	MCV	PLT	заболевание ↔ PLT
2	31	заболевание	RBC	MCV	WBC	заболевание ↔ MCV
3	40	заболевание	RBC	MCV	HGB	заболевание ↔ MCV
4	45	заболевание	RBC	MCV	MCH	заболевание ↔ MCV
5	40	заболевание	RBC	MCV	MCHC	заболевание ↔ MCV
6	34	заболевание	MCV	PLT	WBC	заболевание ↔ PLT
7	35	заболевание	MCV	PLT	HGB	заболевание ↔ PLT
8	33	заболевание	MCV	PLT	MCH	заболевание ↔ PLT
9	32	заболевание	MCV	PLT	MCHC	заболевание ↔ PLT
10	41	заболевание	PLT	WBC	RBC	заболевание ↔ PLT
11	26	заболевание	PLT	WBC	HGB	заболевание ↔ PLT
12	26	заболевание	PLT	WBC	MCH	заболевание ↔ PLT
13	34	заболевание	PLT	WBC	MCHC	заболевание ↔ PLT
14	36	заболевание	WBC	HGB	RBC	заболевание ↔ WBC
15	39	заболевание	WBC	HGB	MCV	заболевание ↔ WBC
16	38	заболевание	WBC	HGB	MCH	заболевание ↔ MCH
17	31	заболевание	WBC	HGB	MCHC	заболевание ↔ WBC
18	37	заболевание	HGB	MCH	RBC	заболевание ↔ HGB
19	38	заболевание	HGB	MCH	MCV	заболевание ↔ MCH
20	31	заболевание	HGB	MCH	PLT	заболевание ↔ PLT
21	34	заболевание	HGB	MCH	MCHC	заболевание ↔ MCH
22	30	заболевание	MCH	MCHC	RBC	заболевание ↔ MCH
23	41	заболевание	MCH	MCHC	MCV	заболевание ↔ MCV
24	36	заболевание	MCH	MCHC	PLT	заболевание ↔ PLT
25	30	заболевание	MCH	MCHC	WBC	заболевание ↔ WBC
26	35	заболевание	RBC	PLT	HGB	заболевание ↔ PLT
27	34	заболевание	RBC	PLT	MCH	заболевание ↔ PLT
28	38	заболевание	RBC	PLT	MCHC	заболевание ↔ PLT
29	36	заболевание	RBC	WBC	MCH	заболевание ↔ MCH
30	40	заболевание	RBC	WBC	MCHC	заболевание ↔ WBC
31	33	заболевание	RBC	HGB	MCHC	заболевание ↔ HGB
32	44	заболевание	MCV	WBC	MCH	заболевание ↔ MCV
33	35	заболевание	MCV	WBC	MCHC	заболевание ↔ MCV
34	33	заболевание	MCV	HGB	MCHC	заболевание ↔ MCV
35	25	заболевание	PLT	HGB	MCHC	заболевание ↔ PLT

В то время как число реконструктивных гипотез для аналогичных систем, полученных методом Клира, составляет 114 (рисунок 42). Таким образом, разработанный модифицированный численный метод структурированных систем позволил сократить число реконструктивных гипотез в три раза и, соответственно, уменьшить объем вычислительной обработки в рамках реконструктивного анализа, что подтверждает эффективность модификации.

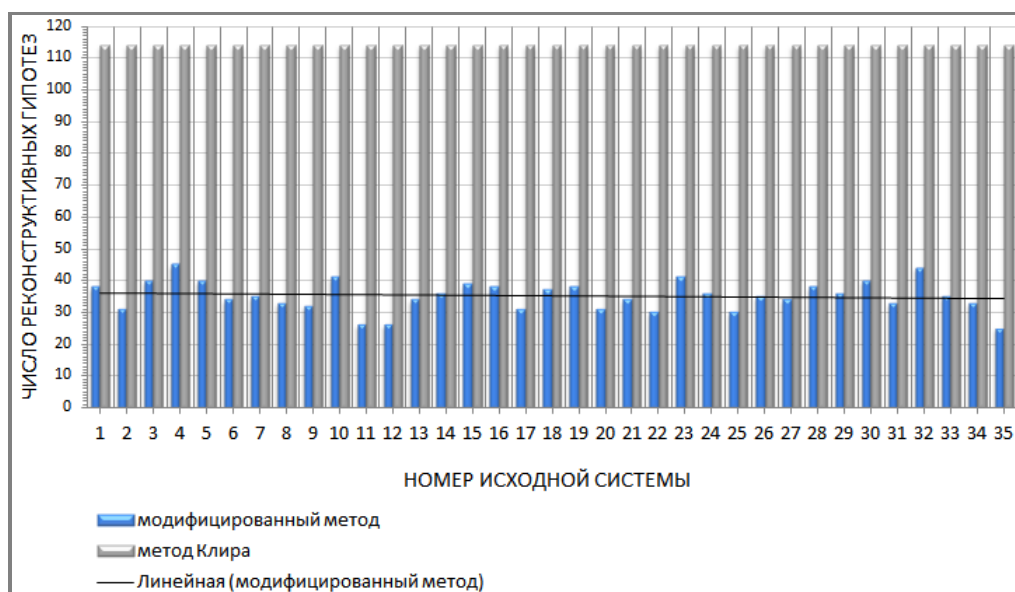


Рисунок 42 – Диаграмма сравнений числа реконструктивных гипотез, полученных модифицированным методом и методом Клира

На основе результатов вычислений можно сделать вывод, что наибольшую значимость для дальнейшего исследования в них показали компоненты крови: PLT (в 15 исходных системах), MCV (в 8 исходных системах), WBC (в 5 исходных системах), MCH (в 5 исходных системах), в то время как компонент HGB (в 2 исходных системах) показал значительно меньшее влияние. Далее производился реконструктивный анализ четырех систем, содержащих уникальные сочетания установленных значимых для исследования компонентов, это системы 6, 8, 12 и 32 (таблица 5).

График зависимости информационного расстояния от степени уточнения (рисунок 43) показывает, что высокий уровень реконструируемости исходной системы №6 сохраняется вплоть до уровня 11, в остальных системах этот

показатель ниже. Это говорит о том, что зависимость переменных может быть установлена на более низких уровнях уточнения, таким образом, может быть упразднен анализ гипотез на последующих уровнях.

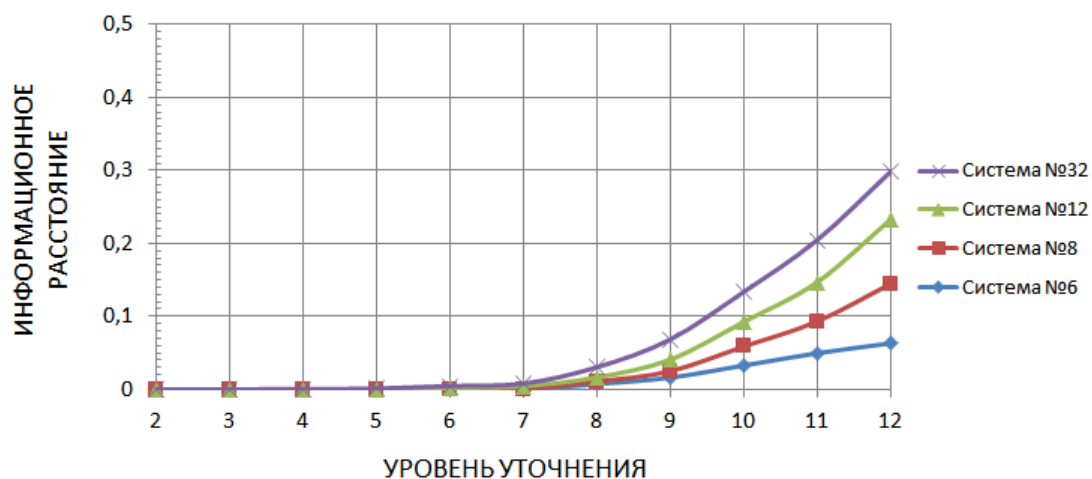


Рисунок 43 – График реконструируемости значимых систем

В трех из них наибольшую значимость показали компоненты PLT и MCV. Для определения наиболее сильной взаимосвязи каждого из указанных компонентов с заболеванием, была исследована соответствующая трехкомпонентная система. Таким образом, реконструктивный анализ и данные об информационных расстояниях для полученных гипотез (таблица 6) показали, что у исследуемой группы вид заболевания сильнее связан с показателями компонента крови PLT (тромбоциты).

Таблица 6 – Результаты заключительного реконструктивного анализа

Степень уточнения	Наборы	Расстояния
2	12 / 13 / 23	0.001600
3	12 / 13	0.017030
3	12 / 23	0.036180
3	13 / 23	0.009720
4	13 / 2	0.037430
5	1 / 2 / 3	0.096530

Принятые элементы системы: v_1 – заболевание (целевая) (1), v_2 – MCV (средний объем эритроцита) (2), v_3 – PLT (тромбоциты) (3).

Курсивом в таблице 6 отмечены реконструктивные гипотезы с удовлетворяющим требованиям исследователя информационным расстоянием от исходной системы. Жирным шрифтом в таблице обозначена ключевая реконструктивная гипотеза, указывающая на наиболее сильную взаимосвязь.

Зависимость информационного расстояния от уровня уточнения, полученная от моделирования результирующей системы, содержащей наиболее значимые показатели, представлена на рисунок 44.

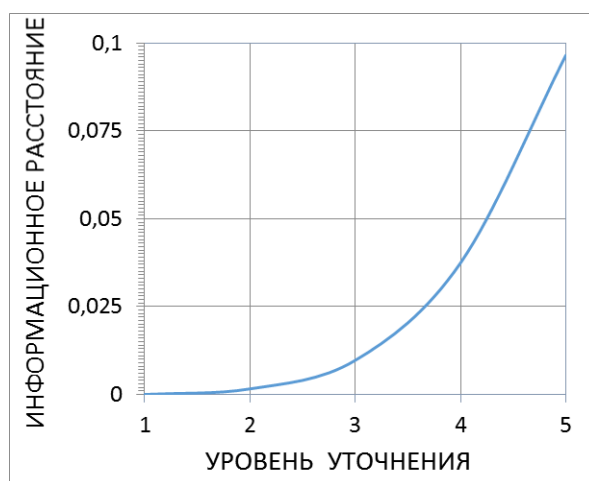


Рисунок 44 – График зависимости характеристик реконструктивного анализа модели гемограмм

Таким образом, чем ближе декомпозиция к исходной системе, тем меньше информационное расстояние, что полностью согласуется с его определением по формуле (36), так как первому уровню уточнения соответствует сама исследуемая система, а информационное расстояние на последующих уровнях характеризует соответствие реконструкций, полученных путем декомпозиции системы, исходной системе. График позволяет также оценить уровень реконструируемости.

После анализа гемограмм для исследуемой группы больных методами структурированных систем показано, что с типом заболевания наиболее сильно взаимосвязан уровень тромбоцитов (гипотеза 13 / 2), в то время как значение среднего объема эритроцитов связано значительно меньше.

Если выделить из имеющихся в гемограммах данных полученную взаимосвязь с элементом v_3 (единица измерения PLT – 10^9 кл/л), получим, что

при хроническом лимфолейкозе:

PLT со значением меньше 100 встречается в 57 гемограммах, от 100 до 200 – в 86 гемограммах, от 200 до 300 – в 5 гемограммах, от 300 до 400 – в 1 гемограмме, более 400 – в 4 гемограммах;

при эритремии:

PLT со значением меньше 100 встречается в 10 гемограммах, от 100 до 200 – в 6 гемограммах, от 200 до 300 – в 14 гемограммах, от 300 до 400 – в 25 гемограммах, более 400 – в 83 гемограммах.

Для хронического лимфолейкоза действительно характерно снижение уровня тромбоцитов относительно нормы [178] и для исследуемой группы его наиболее вероятное значение попадает в интервал от $100 \cdot 10^9$ кл/л до $200 \cdot 10^9$ кл/л. Для эритремии характерно повышение уровня тромбоцитов относительно нормы [178] и для исследуемой группы его наиболее вероятное значение превышает $400 \cdot 10^9$ кл/л.

Полученные выводы соответствуют медицинской практике и согласуются с выводами медицинских исследований [179, 180]. Более того получена новая информация о том, что наибольшее взаимовлияние с видом заболевания среди компонентов, указанных в гемограммах исследуемой группы, имеет уровень тромбоцитов – PLT.

В рамках экспериментального исследования программного комплекса также проведена апробация модуля *M2* для решения задачи объединения трех систем (таблица 7).

Таблица 7 – Системы с поведением с соответствующими вероятностными функциями поведения

	v_1	v_2	${}^1f(x)$		v_2	v_3	${}^2f(y)$		v_1	v_3	${}^3f(z)$
$x=$	0	0	0,2	$y=$	0	0	0,15	$z=$	0	0	0,3
	0	1	0,4		0	1	0,15		0	1	0,3
	1	0	0,1		1	0	0,3		1	0	0,15
	1	1	0,3		1	1	0,4		1	1	0,25

Проанализируем исходные данные: элементы структурированной системы – системы с поведением без памяти, состоящие из переменных с бинарными состояниями. Проверка на локальную согласованность включает исследование проекций для переменных элементов системы $\{v_1, v_2, v_3\}$:

$$\begin{cases} [{}^1f \downarrow \{v_1(0)\}](x) = [{}^3f \downarrow \{v_1(0)\}](z) = 0,6, \\ [{}^1f \downarrow \{v_1(1)\}](x) = [{}^3f \downarrow \{v_1(1)\}](z) = 0,4; \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} [{}^1f \downarrow \{v_2(0)\}](x) = [{}^2f \downarrow \{v_2(0)\}](y) = 0,3, \\ [{}^1f \downarrow \{v_2(1)\}](x) = [{}^2f \downarrow \{v_2(1)\}](y) = 0,7; \end{cases} \quad (46)$$

$$\begin{cases} [{}^2f \downarrow \{v_3(0)\}](y) = [{}^3f \downarrow \{v_3(0)\}](z) = 0,45, \\ [{}^2f \downarrow \{v_3(1)\}](y) = [{}^3f \downarrow \{v_3(1)\}](z) = 0,55. \end{cases} \quad (47)$$

Таким образом, из (45-47) следует, что элементы структурированной системы локально согласованы. Для построения реконструктивного семейства гипотезы полной системы обозначим неизвестные вероятности состояний переменных через p_i , $i = \overline{0,7}$.

$$\begin{cases} p_0 = f(v_1, v_2, v_3) = f(0,0,0), p_1 = f(0,0,1), \\ p_2 = f(0,1,0), p_3 = f(0,1,1), p_4 = f(1,0,0), \\ p_5 = f(1,0,1), p_6 = f(1,1,0), p_7 = f(1,1,1). \end{cases}$$

Тогда реконструктивное семейство определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} p_0 + p_1 = 0,2, & p_0 + p_4 = 0,15, \\ p_0 + p_2 = 0,13, & p_1 + p_3 = 0,3, \\ p_1 + p_5 = 0,15, & p_2 + p_3 = 0,4, \\ p_2 + p_6 = 0,3, & p_3 + p_7 = 0,7, \\ p_4 + p_5 = 0,1, & p_4 + p_6 = 0,15, \\ p_5 + p_7 = 0,25, & p_6 + p_7 = 0,3. \end{cases}$$

Выразив переменные системы через p_0 , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} p_1 = 0,2 - p_0, & p_2 = 0,3 - p_0, \\ p_3 = 0,1 + p_0, & p_4 = 0,15 - p_0, \\ p_5 = -0,05 + p_0, & p_6 = p_0, \\ p_7 = 0,3 - p_0. \end{cases} \quad (48)$$

Из свойства $p_i \geq 0, i = \overline{0,7}$ и системы уравнений (48) получим следующие ограничения:

$$\begin{cases} p_1 \geq 0 \Rightarrow p_0 \leq 0,2, \\ p_2 \geq 0, p_7 \geq 0 \Rightarrow p_0 \leq 0,3, \\ p_4 \geq 0 \Rightarrow p_0 \leq 0,15, \\ p_5 \geq 0 \Rightarrow p_0 \geq 0,05. \end{cases} \quad (49)$$

Следовательно, для p_0 справедливо: $0,05 \leq p_0 \leq 0,15$. Тогда из (49) определим реконструктивное семейство для искомой системы (таблица 8):

Таблица 8 – Реконструктивное семейство

v_1	v_2	v_3	$f(c)$
0	0	0	$0,05 \leq p_0 \leq 0,15$
0	0	1	$p_1 = 0,2 - p_0$
0	1	0	$p_2 = 0,3 - p_0$
0	1	1	$p_3 = 0,1 + p_0$
1	0	0	$p_4 = 0,15 - p_0$
1	0	1	$p_5 = -0,05 + p_0$
1	1	0	$p_6 = p_0$
1	1	1	$p_7 = 0,3 - p_0$

Определим оптимальный выбор единственной гипотезы относительно искомой системы из реконструктивного семейства посредством применения программного комплекса, таким образом получим решение задачи оптимизации.

После запуска модуля построения полной системы ($M2$) область данных окна программы пуста. Главное окно содержит меню с пунктами: «Меню» и «Справка» (рисунок 45), для удобства команды вынесены на панель инструментов.

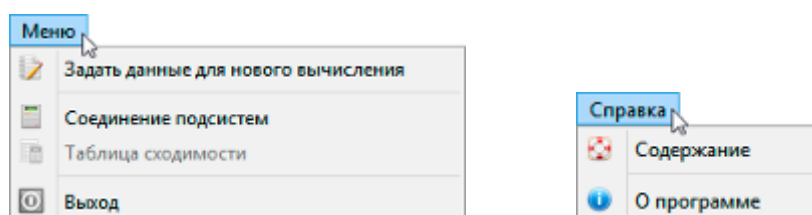


Рисунок 45 – Снимки пунктов меню модуля $M2$

При выборе пункта «Задать данные для нового вычисления» на экране появляется окно «Конструктор», которое позволяет задать подсистемы для задачи построения полной системы. Осуществляется выбор числа свойств (переменных), которые входят в различные подсистемы (рисунок 46).

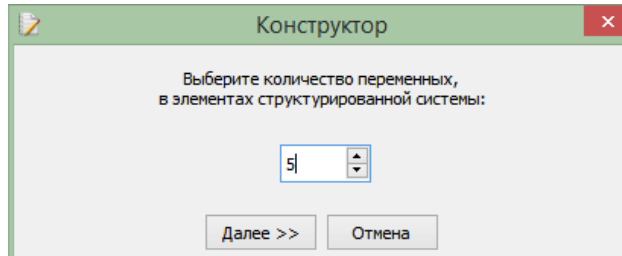


Рисунок 46 – Снимок окна «Конструктор»

Далее производится формирование подсистем путем выбора переменных, которые будут входить в каждую из них (рисунок 47).

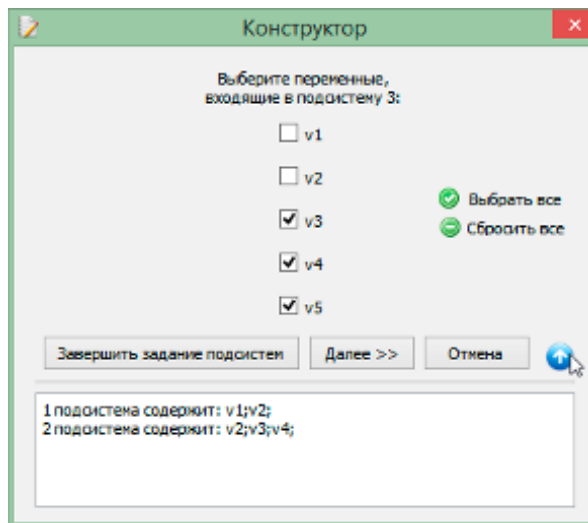


Рисунок 47 – Снимок окна «Конструктор»

Конструктор на данном этапе оснащен информационным полем, которое отображает подсистемы, с входящими в них переменными. После формирования более одной подсистемы в окне конструктора появляется кнопка «Завершить задание подсистем». По окончании формирования подсистем с помощью конструктора определяются состояния переменных. После чего вводятся значения функций поведения для подсистем. На любом из этапов работа конструктора может быть прервана нажатием кнопки «Отмена».

После завершения работы конструктора и формирования подсистем, область данных в главном окне обновится, подсистемы будут распределены по вкладкам (по две подсистемы на вкладке, что соответствует методике соединения систем в системологии), в данном компьютерном эксперименте программой автоматически создано три вкладки. Объединение систем выполняется с помощью пункта меню «Соединение систем». После выбора соответствующего пункта на экране отобразится окно «Ввод данных» (рисунок 48). Поиск полной системы будет производиться с учетом введенного значения погрешности, которое используется при проецировании функций поведения. Если для f выполняется условие: $[f \downarrow^x S] =^x f$ для всех $x \in N_q$ (условие для проекций), то получена несмещенная реконструкция, в противном случае f не соответствует полной системе и противоречит элементам структурированной системы, а значит, должна быть уточнена с помощью итеративной процедуры соединения.

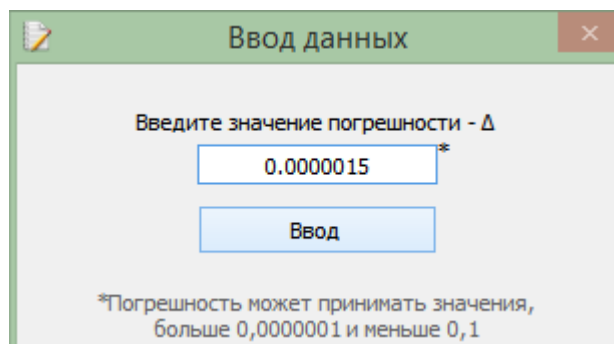


Рисунок 48 – Снимок окна «Ввод данных»

Выполнение базовой процедуры соединения сопровождается выводом информационного сообщения (диалог прогресса). В том случае, если после выполнения базовой процедуры соединения полная система не найдена, выполняется итеративная процедура соединения, что сопровождается выводом соответствующего сообщения.

По завершению поиска программа информирует исследователя, найдена несмещенная реконструкция полной системы или нет, или найдена реконструкция с указанной точностью. Нахождение реконструкции говорит о совместимости

заданных подсистем, возможности их совместной эксплуатации в составе объединенной системы.

В приведенном вычислительном эксперименте поиск полной системы завершился успешно, программа вывела соответствующее сообщение (рисунок 49).

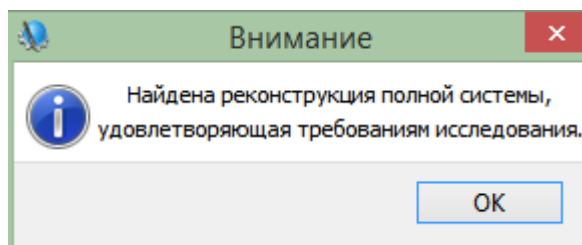


Рисунок 49 – Снимок информационного сообщения

В результате проведения компьютерного эксперимента в окне программы отобразилась полная система с последовательностью функций поведения, полученных после выполнения базовой и итеративной процедур соединения (рисунок 50). Значения результирующей функции поведения расположены в последнем столбце.

Подсистема 1 и 2				Подсистема 3			
v1	v2	f1		v2	v3	f2	
1	0	0	0.2	1	0	0	0.15
2	0	1	0.4	2	0	1	0.15
3	1	0	0.1	3	1	0	0.3
4	1	1	0.3	4	1	1	0.4

	v1	v2	v3	(2f*1f)	(3f*(2f*1f))	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6	i = 7	i = 8	i = 9
1	0	0	0	0.05000000	0.04285714	0.11250000	0.10795149	0.10802997	0.10814409	0.10814750	0.10814133	0.10814167	0.10814256	0.10814251
2	0	0	1	0.05000000	0.03333333	0.08750000	0.09134897	0.09175898	0.09185591	0.09185301	0.09185805	0.09185833	0.09185758	0.09185762
3	0	1	0	0.30000000	0.25714286	0.19636364	0.19183056	0.19197003	0.19186880	0.19186963	0.19185867	0.19185837	0.19185757	0.19185749
4	0	1	1	0.40000000	0.26666667	0.20363636	0.20731052	0.20824102	0.20813120	0.20813052	0.20814195	0.20814163	0.20814228	0.20814238
5	1	0	0	0.02500000	0.01500000	0.04382022	0.04204851	0.04198750	0.04185118	0.04185250	0.04185728	0.04185710	0.04185744	0.04185748
6	1	0	1	0.02500000	0.01923077	0.05617978	0.05865103	0.05833822	0.05814882	0.05814699	0.05814316	0.05814290	0.05814242	0.05814239
7	1	1	0	0.22500000	0.13500000	0.11072555	0.10816944	0.10801250	0.10812990	0.10813037	0.10814272	0.10814288	0.10814243	0.10814252
8	1	1	1	0.30000000	0.23076923	0.18927445	0.19268948	0.19166178	0.19187010	0.19186948	0.19185684	0.19185712	0.19185772	0.19185761

Рисунок 50 – Снимок главного окна модуля *M2*

Таблица сходимости (рисунок 51) демонстрирует результат проверки на сходимость в процессе выполнения модифицированного алгоритма итеративной

процедуры соединения ($|f_i - f_{i-q}| > \Delta_S$). Последний столбец выделен цветом, так как он показывает результирующую проверку.

	v1	v2	v3	i = 3	i = 6	i = 9
1	0	0	0	0.06517283	0.00011136	0.00000118
2	0	0	1	0.05842565	0.00009907	0.00000043
3	0	1	0	0.06517283	0.00011136	0.00000118
4	0	1	1	0.05842565	0.00009907	0.00000043
5	1	0	0	0.02698750	0.00013022	0.00000020
6	1	0	1	0.03910745	0.00019506	0.00000077
7	1	1	0	0.02698750	0.00013022	0.00000020
8	1	1	1	0.03910745	0.00019506	0.00000077

Рисунок 51 – Снимок окна «Проверка на сходимость»

Для исследуемых подсистем полная система была найдена на девятой итерации выполнения алгоритма итеративной процедуры соединения. Обобщением работы программы является полученная гипотетическая полная система с соответствующей ей функцией поведения (таблица 9).

Таблица 9 – Реконструктивная гипотеза относительно полной системы

v_1	v_2	v_3	$f(c)$
0	0	0	0,108
0	0	1	0,092
0	1	0	0,192
0	1	1	0,208
1	0	0	0,042
1	0	1	0,058
1	1	0	0,108
1	1	1	0,192

Далее рассмотрим применение модуля $M3$. Исследуем исходную (начальную) систему, описывающую поведение двух птиц за период видеофиксации – 90 секунд:

$$O = (\{(a_i, A_i) \mid i \in N_2\}, \{b_1, B_1\}), \quad (50)$$

где a_1, a_2 – поведение птиц, b_1 – временной параметр.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Поведение птицы: } \dot{V}_1 = \{ \text{нападение,} \\ \text{выпрямление,} \\ \text{разбрасывание травы,} \\ \text{волнение, отступление} \} \rightarrow \\ \rightarrow V_1 = \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\ \dot{V}_2 = \dot{V}_1, \quad V_2 = V_1, \quad e_2 = e_1. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{T} \rightarrow T, \\ T = N_{45}, \\ \varepsilon(k) = t_k (k \in N_{45}). \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \omega^{-1}(t_1) < 2, \\ 2 \leq \omega^{-1}(t_2) < 4, \\ \dots \\ 88 \leq \omega^{-1}(t_{45}) < 90. \end{array} \right. \quad (51)$$

\dot{T} – линейно упорядоченное временное множество.

Временной период был разделен на двухсекундные интервалы (51), в течение которых проводилась этологическая оценка поведения птиц и соотнесения его с выделенными состояниями [156] (таблица 10).

Таблица 10 – Исходная система данных

t, c	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
v_1	1	1	0	3	3	3	3	3	4	3	3	0	2	1	1	1
v_2	4	3	4	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	2	1	1
t, c	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
v_1	1	4	4	4	4	4	0	2	2	4	4	4	4	4	4	4
v_2	1	4	4	4	4	3	1	4	2	2	4	4	4	4	4	4
t, c	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90			
v_1	2	2	2	2	2	0	2	1	0	2	1	1	4			
v_2	4	4	1	1	1	3	3	1	3	3	3	3	4			

После запуска программного модуля загружаем начальную систему, для этого в меню «Файл» необходимо выбрать пункт меню «Загрузить».

Для того чтобы приступить к обработке файла с данными, необходимо указать параметры наибольшей допустимой маски:

1. Направление движение маски (от минимального или максимального значения параметра): вниз по матрице данных; вверх по матрице данных.
2. Глубину маски.

3. Параметр уровень сложности, который характеризуется числом выборочных переменных, задействованных в маске. Данный параметр не является обязательным.

Раздел «Настройки для входных переменных» заполняется в случае, если рассматривается направленная система. В нем указываются входные переменные и наличие у исследователя информации о них. Данные параметры не являются обязательными для нейтральных систем.

Раздел «Настройки вычислений» определяет, будут ли вычисляться и отображаться в отчете все маски или только оптимальные.

Как только все требуемые параметры указаны, необходимо нажать кнопку «обработка файла» для подготовки к вычислениям (рисунок 52).

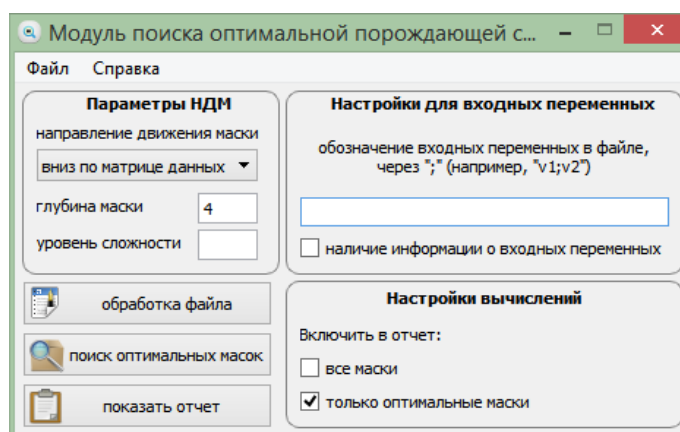


Рисунок 52 – Снимок главного окна модуля *M3*

Если уровень сложности не указан, то будет выдано соответствующее информационное сообщение (рисунок 53).

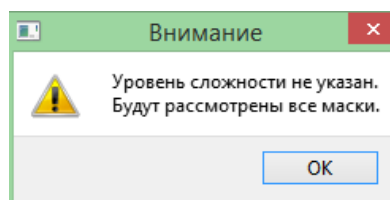


Рисунок 53 – Снимок информационного сообщения

После обработки файла станет активна кнопка «поиск оптимальных масок». Обработка файла и поиск оптимальных масок подразумевает: выполнение в автоматическом режиме по указанным параметрам генерации масок, отбраковки

несодержательных масок, нахождение порождающих и порождаемых подмасок, формирование порождающих систем, вычисление порождающих нечеткостей и вывод отчета. После полного завершения всех расчетов становится активна кнопка «показать отчет», которая позволяет сформировать отчет и открыть его для просмотра. В зависимости от указанных настроек вычислений отчет содержит все маски или только оптимальные.

При исследовании маски с параметрами: глубина, равная четырем; направление движения «вниз по матрице данных» и «вверх по матрице данных», получены выводы, представленные в таблице 11 и таблице 12. Подтверждается тот факт, что чем сложнее маска, тем меньше порождающая нечеткость, так как в сложных масках используется максимальное количество информации. Оценка полученных порождающих систем показала, что без потери информации может быть использована маска с меньшей сложностью.

Таблица 11 – Порождающая нечеткость для направления движения маски в сторону возрастания параметра

Уровень сложности, $|M|$	Нечеткость
2	3,296
3	1,824
4	0,744
5	0,418
6	0,292
7	0,244

Таблица 12 – Порождающая нечеткость для направления движения маски в сторону убыванию параметра

Уровень сложности, $|M|$	Нечеткость
2	3,396
3	1,871
4	0,837
5	0,477
6	0,292
7	0,244

В обоих направлениях движения маски на каждом уровне сложности выявлено по одной оптимальной маске. График (рисунок 54) представляет собой обобщение приведенных выше результатов вычислительного эксперимента по исследованию порождающих систем с различными параметрами и отражает изменение нечеткости порождающих систем в зависимости от уровня сложности маски. Сравнительный анализ изменения характеристик порождающих систем, полученных для различных направлений движения маски по матрице данных показывает, что для масок с заданными параметрами направление возрастания

параметра предпочтительнее для исследования, так как при нем их порождающая нечеткость меньше.

Следовательно, для исследуемой этологической системы легче предсказывать будущие состояния системы, чем определять прошлые. Если есть возможность выбрать один из порядков следования, стоит выбрать движение в сторону возрастания t .

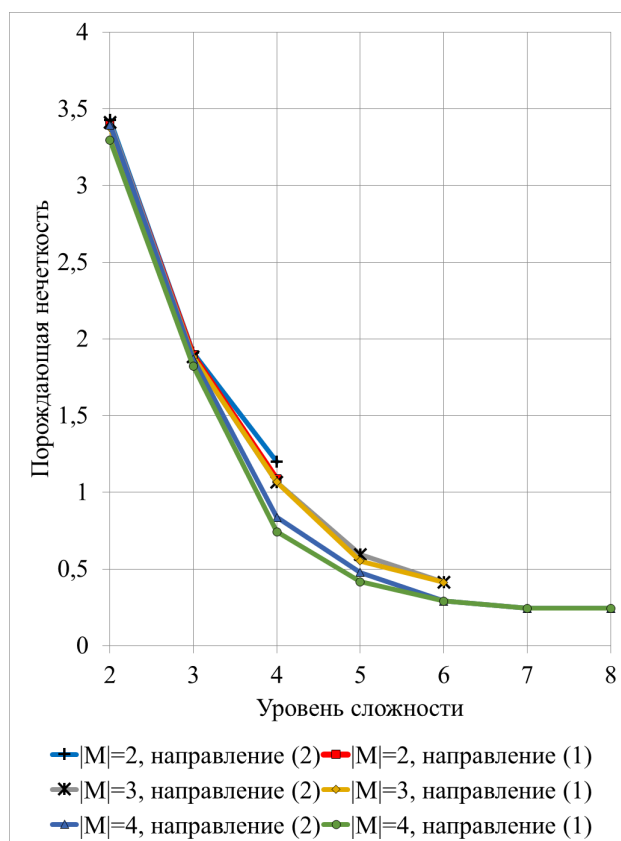


Рисунок 54 – Изменение характеристик порождающих систем

Таким образом, получена новая информация о рассматриваемой системе, позволяющая сформировать схему ее дальнейшего моделирования и исследования.

Из оценки порождающих систем, полученных посредством применения программной реализации созданного численного алгоритма [49], следует, что для исследования системы и порождения данных без потери информации может быть использована маска с меньшей сложностью (направление возрастания параметра,

маска №6, $|M| = 7$, $H(G | \bar{G}) = 0,244$; направление убывания параметра, маска №3, $|M| = 7$, $H(G | \bar{G}) = 0,244$).

Для исследования заданной системы данных на маске меньшего размера была выбрана глубина маски равная трем, уровень сложности равный двум. Снимок отчета, полученного для направления движения маски в сторону возрастания параметра t , представлен на рисунке 55. Отчет формируется в текстовом формате. Маски, отвечающие заданным требованиям, находятся на втором уровне. Программой сгенерировано пять порождающих систем, в отчете фигурирует одна маска (так как в настройках вычислений была выбрана опция «только оптимальные маски») – маска №1, соответствующая оптимальной порождающей системе, то есть системе с наименьшей порождающей нечеткостью на указанном уровне ($H=3,37884$).

Далее рассмотрим результаты, полученные посредством применения комплекса программ, для направления движения маски в сторону убывания параметра t . Так как направление движения маски изменено, генерируемые маски будут отличаться от масок с противоположным направлением ввиду соблюдения требований, предъявляемых в системологии к содержательным подмаскам. Программой сформирован отчет (рисунок 56), найдена маска №4, соответствующая оптимальной порождающей системе с наименьшей порождающей нечеткостью ($H=3,4127$).

```

report.txt
1 -----
2 ***** REPORT *****
3 by 19.02.2017 16:34
4 Direction for masks: down;
5 Level of complexity: 2 selective variables;
6 Mask depth = 3;
7 Input variables: - ;
8 Information about input variables: - ;
9 -----
10 ===== LEVEL#6 contains 0 mask =====
11 ===== LEVEL#5 contains 0 mask =====
12 ===== LEVEL#4 contains 0 mask =====
13 ===== LEVEL#3 contains 0 mask =====
14 ===== LEVEL#2 contains 5 mask =====
15 -----
16 OPTIMAL MASK#1
17 v1:v2
18 |_|_|
19 |_|_|
20 |x|x|
21 ENTROPY (H)=3.37884
22 ===== LEVEL#1 contains 0 mask =====
23

```

Рисунок 55 – Снимок файла отчета для направления движения маски с возрастанием параметра

```

report.txt
1 -----
2 ***** REPORT *****
3 by 19.02.2017 16:37
4 Direction for masks: up;
5 Level of complexity: 2 selective variables;
6 Mask depth = 3;
7 Input variables: - ;
8 Information about input variables: - ;
9 -----
10 ===== LEVEL#6 contains 0 mask =====
11 ===== LEVEL#5 contains 0 mask =====
12 ===== LEVEL#4 contains 0 mask =====
13 ===== LEVEL#3 contains 0 mask =====
14 ===== LEVEL#2 contains 5 mask =====
15 -----
16 OPTIMAL MASK#4
17 v1:v2
18 |x|_|
19 |_|x|
20 |_|_|
21 ENTROPY (H)=3.4127
22 ===== LEVEL#1 contains 0 mask =====
23

```

Рисунок 56 – Снимок файла отчета для направления движения маски с убыванием параметра

На рисунке 57 и рисунке 58 представлены графики зависимости, которые являются иллюстрацией сравнительного анализа результатов проведенных вычислительных экспериментов для $\Delta M = 3, |M| = 3$ и $\Delta M = 2, |M| = 2$ с известными результатами [49] и показывают высокую точность разработанного численного алгоритма.

Результаты экспериментального исследования подтверждают тот факт, что сложность маски обратно пропорциональна порождающей нечеткости системы, сформированной на ее основе (в программной реализации сложность выражена числом задействованных выборочных переменных). Связано это с тем, что в сложных масках используется больше информации об исходной системе.

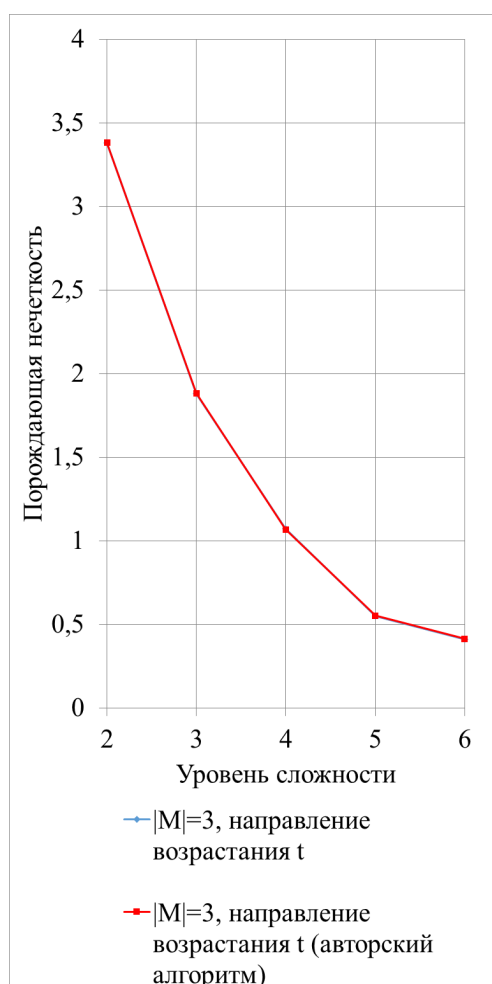


Рисунок 57 – Изменение характеристик порождающих систем при $\Delta M = 3$, полученных посредством авторского алгоритма и представленных в работе [24]

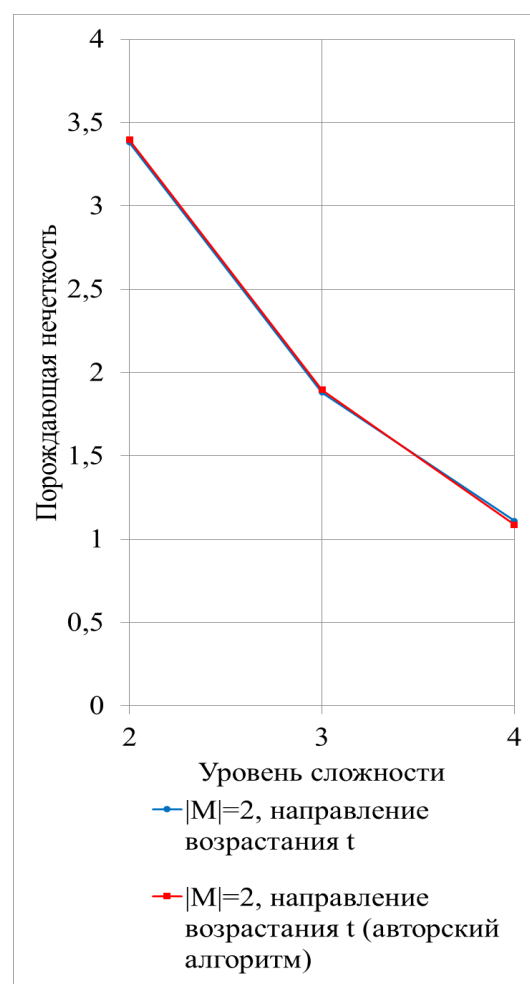


Рисунок 58 – Изменение характеристик порождающих систем при $\Delta M = 2$, полученных посредством авторского алгоритма и представленных в работе [24]

При этом выявлено, что с увеличением глубины маски: стремительно возрастает число содержательных подмасок; растет объем вычислительной обработки выборочных переменных; уменьшается опора на эмпирическую базу исследования (число неполных выборок равно $2(\Delta M - 1)$); возрастает число элементов, составляющих начальное условие, определение которого может вызвать определенные трудности. Таким образом, ограничение глубины маски является оправданным.

Применение математического аппарата порождающих систем позволяет определить оптимальное представление данных при исследовании систем на соответствующем эпистемологическом уровне и осуществить порождение состояний их элементов на заданном параметрическом множестве, что является необходимым в условиях недостающей информации о состояниях свойств системы; кроме того, на базе порождающих систем, основанных на структуре связей элементов системы, которую представляет маска, может быть произведен выбор существенных свойств объекта, исходя из строения оптимальных порождающих систем, сформированных из системы данных с учетом методологических отличий.

Комплекс программ реализует разработанные компьютерные алгоритмы, дает возможность численного исследования слабоформализованных систем независимо от предметной области, позволяет: сформировать исходную систему в терминах системологии; определить значимые переменные системы; прогнозировать состояние системы по результатам обработки эмпирических данных; производить декомпозицию системы и объединять системы в согласованную общую систему; проводить исследование дальнейшего функционирования сформированной общей системы; проводить генерацию порождающих систем и выбор их оптимальной пространственной структуры с учетом заданных требований; проводить оценку порождающей нечеткости систем для порождения данных на основе частичной информации, в случае недостающей информации о системе. Кроме того, реализован программный класс табличной модели, предназначенный для экономии оперативной памяти, который позволяет

загружать в оперативную память компьютера только отображаемую в момент просмотра информацию и используется в программном комплексе вместо стандартных табличных классов, потребляющих оперативную память для всего содержимого таблиц.

Проведенное экспериментальное исследование программного комплекса показало обоснованность научных разработок, представленных в рамках диссертационного исследования. Результаты вычислительных экспериментов по решению содержательных системных задач подтверждают эффективность созданных математических моделей, численных алгоритмов и метода. Таким образом, развитие математических алгоритмов и методов системологии позволяет расширить применение междисциплинарных методов для решения практических задач в области поддержки принятия решений и исследования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой.

Заключение

Диссертационная работа посвящена развитию системологических методов исследования математических моделей неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой, представленных на эпистемологических уровнях системологии. Предложены новые численные алгоритмы и метод решения системных задач, реализация которых в виде комплексов проблемно-ориентированных программ позволяет проводить вычислительные эксперименты по исследованию сложных систем. В настоящее время получили широкое распространение неоднородные слабоформализованные системы с динамической структурой. При их моделировании исследователь имеет в распоряжении неполный набор эмпирических данных, отсутствие какой-либо информации о характеристиках системы и законе ее функционирования. Максимальный учет особенностей указанного класса систем достигается применением математических методов системологии, охватывающих динамику развития систем, что называется, «на лету». Однако оно ограничено некоторыми трудностями, связанными с большим количеством численно обрабатываемых реконструктивных гипотез, избыточными итеративными операциями [52, 54, 55] и отсутствием четких унифицированных алгоритмов решения системных задач на некоторых эпистемологических уровнях [49]. В диссертационной работе получены новые результаты в области исследования неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой методами системологии Клира.

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Осуществлено математическое моделирование порождающих систем, включающее анализ функции поведения и требований, предъявляемых к нечеткости оптимальных систем. Построение математической модели уровня структурированных систем и ее расширенной версии включает наличие целевых

переменных и включает соответствие ограничениям, предъявляемым к информационному расстоянию системы.

2. Численный алгоритм генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, осуществляющий создание на базе исследуемой системы систем, порождающих состояния выборочных переменных, а также оценку их пространственной структуры на основе нечетких мер с учетом заданных исследователем параметров: вида обрабатываемой информации, типа системы, уровня сложности искомых систем, направления исследования матрицы данных. Предложена математическая постановка задачи поиска оптимальной порождающей системы и алгоритм ее решения, на основе разработанной математической модели. На основе созданного численного алгоритма выполнено исследование поведения птиц на основе этологических оценок, представленных математической моделью исходной системы и соответствующей системой данных. В качестве эмпирической базы исследования выступают экспериментальные данные из работы [156]. Результаты компьютерного моделирования показали высокую точность созданного численного алгоритма [49]. Применение программной реализации алгоритма [50, 169, 49] показало полное соответствие полученным в работе [24] результатам их обработки для представленных там случаев, для неописанных в ней случаев получена новая информация о структуре системы на основе заданных требований, произведен поиск оптимальных систем на различных уровнях сложности, полученные параметрически инвариантные структурные ограничения применимы для порождения состояний системы.

3. Модифицированный численный метод структурированных систем, позволяющий определить значимые переменные системы, проводить декомпозицию и синтез систем. Разработанный метод отличается от оригинального метода Клира введением следующих модификаций: целевые переменные и их учет как на этапе формирования решеток уточнения, так и в процессе поиска значимых реконструктивных гипотез; модифицированный алгоритм *RG*-процедуры с сохранением упорядочения решеток по степени

уточнения; учет отклонения информационного расстояния гипотез от исходной системы; задаваемое исследователем значение допустимой погрешности согласованности и ограничение на число шагов итеративной процедуры соединения. Предложены новые подходы к решению задачи оптимизации выбора единственной гипотезы относительно искомой системы из реконструктивного семейства, а также поиска оптимальной декомпозиции сложной системы.

Обоснованность модификации численного метода структурированных систем и достоверность полученных с помощью модифицированного метода результатов подтверждаются сопоставлением качества полученного им решения и количества реконструктивных гипотез, сформированных в процессе решения. Изложенные в диссертационной работе научные разработки обеспечивают возможность исследования точных и адаптивных математических моделей систем, в том числе уровня порождающих и структурированных систем. Апробация производилась путем численного исследования данных гемограмм и содержательной задачи синтеза систем. Введенные модификации позволили сократить число реконструктивных гипотез без потери точности вычислительного результата, при полном сохранении значений информационных расстояний и значимости результирующих гипотез, по сравнению с оригинальным методом Джорджа Клира [51, 52]; оценка достоверности проведена путем сравнения результатов вычислительных экспериментов с данными других авторов и показала, что полученные выводы полностью согласуются с результатами медицинских исследований и результатами исследований, проводимых в работах [179, 180, 24].

4. Программные алгоритмы, эффективно учитывающие системологическую специфику реализации созданных математических моделей, численных алгоритмов и методов, дающих вычислительный результат без потери точности полученного с их помощью решения. Представленные в диссертационной работе программные алгоритмы представляют интерес, в том числе с точки зрения оптимального набора действий, заложенного в программный комплекс для поддержки принятия решений на уровне информационных структурированных

систем. Так, компьютерные алгоритмы модуля поиска оптимальных порождающих систем основаны на двоичной арифметике и позволяют максимально оптимизировать генерацию соответствующих подсистем путем применения операций сдвига. Переменные представлены в двоичной системе счисления, что позволяет проверять выполнение требований, предъявляемых к содержательным подмаскам, опираясь на разрядность двоичного числа, посредством побитовых операций. Такой подход полностью соответствует системологической методологии – применение аппарата булевой алгебры для выполнения логических преобразований информации обеспечивает абстрагирование задачи и переход от конкретных параметров выборочных переменных в составе маски к их двоичным аналогам.

5. Комплекс программ поддержки принятия решений, осуществляющий автоматизацию решения системных задач. Функционирует на базе созданных численных методов и алгоритмов и отличается: применением разработанных программных алгоритмов и программных классов моделей-представлений больших массивов данных; кроссплатформенностью; междисциплинарностью. Созданный программный комплекс направлен на решение задач в области исследования неоднородных слабоформализованных систем различной природы с динамической структурой, эффективность разработанных в его составе инструментальных средств для поддержки принятия решений [166, 167, 169] обуславливается применением научных разработок, полученных в диссертационной работе, а также экономных с точки зрения отображения хранимых данных оригинальных программных классов и интерфейса в терминах системологии. Программный комплекс апробирован при решении содержательных системных задач – результаты экспериментального исследования подтверждают результаты численного моделирования и полностью согласуются с результатами других авторов [49-52, 58].

Библиографический список

1. Аверьянов, А. Н. Системное познание мира. Методологические проблемы / А. Н. Аверьянов. – М.: Политиздат, 1985. – 263 с.
2. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с.
3. Антонов, А. В. Системный анализ: учеб. для вузов / А. В. Антонов. – М.: Высш. шк., 2004. – 454 с.
4. Баканов, М. И. Теория экономического анализа / М. И. Баканов, М. В. Мельник, А. Д. Шеремет; под ред. М. И. Баканова. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 536 с.
5. Кузьмин, С. А. Социальные системы: опыт структурного анализа / С. А. Кузьмин; Рос. акад. наук, Ин-т соц.-экон. проблем народонаселения. – М.: Наука, 1996. – 191 с.
6. Давыдов, А. А. Конкурентные преимущества системной социологии / А. А. Давыдов. – М.: КомКнига, 2008. – 285 с.
7. Ананьин, Г. Е. Реализация системного подхода в воспитании молодежи / Г. Е. Ананьин. – Ярославль: Изд-во ЯГСХА, 2012. – 136 с.
8. Попов, В. П. Политическая системология / В. П. Попов, И. В. Крайнюченко. – Пятигорск: Изд-во ПГГТУ, 2011. – 136 с.
9. Психология и математика / под ред. Г. Е. Журавлева, Ю. М. Забродина, В. Ю. Крылова, В. Ф. Рубахина. – М.: Наука, 1976 – 296 с.
10. Ганзен, В. А. Системные описания в психологии / В. А. Ганзен. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 176 с.
11. Гумилёв, Л. Н. Чёрная легенда. Друзья и недруги Великой степи / Л. Н. Гумилёв. – СПб.: Ленинградское издательство, 2011. – 448 с.
12. Черкашин, А. К. Географическая системология: правила формирования системных онтологий / А. К. Черкашин // География и природные ресурсы. – 2008. – №2. – С. 14–20.

13. Дуболазов, В. А. Принятие управленческих решений в маркетинге с помощью компьютерных средств / В. А. Дуболазов, Н. В. Павлов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – 209 с.

14. Бурда, А. Г. Моделирование в управлении: учеб. пособие / А. Г. Бурда, Г. П. Бурда. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 250 с.

15. Новиков, А. М. Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М.: Синтег, 2007. – 668 с.

16. Богданов, А. А. Тектология: (Всеобщая организационная наука). В 2-х кн.: Кн. 1. / А. А. Богданов; под ред. Л. И. Абалкина, А. Г. Аганбегяна, Д. М. Гвишиани, А. Л. Тахтаджяна. – М.: Экономика, 1989. – 304 с.

17. Богданов, А. А. Тектология: (Всеобщая организационная наука). В 2-х кн.: Кн. 2. / А. А. Богданов; под ред. Л. И. Абалкина, А. Г. Аганбегяна, Д. М. Гвишиани, А. Л. Тахтаджяна. – М.: Экономика, 1989. – 351 с.

18. Берталанфи, Л. Общая теория систем: критический обзор / Л. фон Берталанфи // Исследование по общей теории систем: Сборник переводов. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.

19. Рапопорт, А. Математические аспекты абстрактного анализа систем / А. Рапопорт // Исследования по общей теории систем: Сборник переводов. – М.: Прогресс, 1969. – С. 83–105.

20. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику / У. Р. Эшби; пер. с англ. Д. Г. Лахути; под ред. В. А. Успенского; с предисл. А. Н. Колмогорова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 432 с.

21. Boulding, K. E. General Systems Theory – the Skeleton of a Science / K. E. Boulding // Management Science. – 1956. – Vol. 2, No. 3. – P. 197–208.

22. Винер, Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. / Н. Винер; пер. с англ. И. В. Соловьева, Г. Н. Поварова; под ред. Г. Н. Поварова. – М.: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – 344 с.

23. George Klir [Электронный ресурс] // Binghamton University: The State University of New York. – Режим доступа: <https://www.binghamton.edu/ssie/people/klir.html> (дата обращения: 18.11.2016).

24. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир; пер. с англ. М. А. Зуева; под ред. А. И. Горлина. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.

25. Мушенко, А. С. Алгоритм иерархической декомпозиции процедуры синтеза систем управления летательными аппаратами / А. С. Мушенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №5 (142). – С. 199–204.

26. Воротников, В. В. Определение структурной сложности децентрализованных телекоммуникационных сетей специальных систем управления методами спектральной теории графов / В. В. Воротников, Ю. А. Кулаков // Электроника и связь: научно-технический журнал. – 2013. – №1 (72). – С. 110–117.

27. Алиев, Т. И. Исследование сложных систем на основе комбинированного подхода / Т. И. Алиев // Сборник докладов Первой Всероссийской научно-практической конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (ИММОД 2003). – СПб.: ЦНИИТС, 2003. – Т.1. – С. 50–55.

28. Кацман, В. Е. Метод многоуровневой декомпозиции в экономических информационных системах / В. Е. Кацман // Прикладная информатика. – 2006. – №3. – С. 130–139.

29. Романов, В. Н. Системный анализ и принятие решений: учеб. пособие / В. Н. Романов. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. – 268 с.

30. Скоз, Е. Ю. Иерархический метод структурного синтеза системы «Управление проектом» [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Скоз Елена Юрьевна. – Рязань, 2005. – 216 с.

31. Швецова, Н. А. Системология в образовании / Н. А. Швецова // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – №6. – С. 93–94.

32. Дорохов, И. Н. К построению изобретающей системы на основе системологии / И. Н. Дорохов, Л. Н. Бутенко, М. А. Цыканова, Н. А. Семенов // Программные продукты и системы. – 2013. – №3. – С. 231–234.

33. Pishchukhin, A. M. Metasystem approach to increase the load factor FMS [Электронный ресурс] / А. М. Pishchukhin // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017): proceedings of the conference. – Vol. 129 (2017). – Режим доступа: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_04003.pdf (дата обращения: 15.12.2017).

34. Ахмедьянова, Г. Ф. Целенаправленная адаптивная система в образовательном процессе / Г. Ф. Ахмедьянова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т.18, №4-1. – С. 175–180.

35. Шандиба, О. Визначення змісту та рівнів дослідження технічних дисциплін / О. Шандиба // Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Педагогіка. – 2015. – Випуск 1, №14. – С. 294–299.

36. Маакот, А. К. М. Методика проектирования модульной структуры информационной системы / А. К. М. Маакот // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – №3 (188). – С. 42–51.

37. Дорохов, И. Н. Компьютерные методы поискового конструирования / И. Н. Дорохов, А. Г. Лебедев, С. А. Калущков // Успехи в химии и химической технологии. – 2013. – Т.27, №1 (141). – С. 62–67.

38. Бутенко, Л. Н. Концепция автоматизированной поддержки технических решений / Л. Н. Бутенко, Е. Н. Шамина, М. В. Бутенко // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №8 (46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 62–64.

39. Зорина, Н. В. Описание объекта моделирования для постановки эксперимента по оцениванию результатов деятельности обучаемого по данным

программ единичного эксперимента / Н. В. Зорина, В. М. Панченко // Интернаука. – № 11 (15). – Ч. 1. – М.: Интернаука, 2017. – С. 25–26.

40. Реут, Д. В. Управление крупномасштабными системами. Теоретико-методологические проблемы [Текст] : дис. ... д-ра экон. наук : 08.00.05 / Реут Дмитрий Васильевич. – М., 2013. – 291 с.

41. Геоэкологический анализ состояния природно-социально-производственных систем / А. А. Ямашкин, А. В. Кирюшин, А. К. Коваленко [и др.]; науч. ред. и сост. А. А. Ямашкин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. – 260 с.

42. Синельникова, Т. И. Философские проблемы принятия оптимальных управленческих решений / Т. И. Синельникова // Вестник ЧелГУ. – 2015. – №9 (364). – С. 89–96.

43. Синельникова, Т. И. Автоматизация решения системных задач методом структурированных систем системологии [Электронный ресурс] / Т. И. Синельникова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №07 (121). – С. 2019–2030. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/128.pdf> (дата обращения: 11.10.2016).

44. Синельникова, Т. И. О целесообразности использования компьютерных структурированных систем в процессе выработки оптимальных управленческих решений / Т. И. Синельникова // Экономика знаний: проблемы управления формированием и развитием: материалы VI Международной научно-практической конференции. – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2014. – С. 317–325.

45. Синельникова, Т. И. Применение компьютерных структурированных систем в процессе принятия управленческих решений / Т. И. Синельникова // Материалы V Международной научно-практической конференции «Академическая наука – проблемы и достижения». – North Charleston, США, 2014. –Т.1. – С. 99–101.

46. Синельникова, Т. И. Возможность применения метода анализа иерархий в процессе выработки решения / Т. И. Синельникова // Научный обозреватель. – Уфа: Инфинити, 2015. – №1 (49). – С. 49–54.

47. Синельникова, Т. И. Определение оптимальной структуры сложной системы на основе применения структурированных систем системологии / Т. И. Синельникова // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки». – North Charleston, США, 2015. – С. 200–202.

48. Синельникова, Т. И. Применение метода структурирования систем для исследования гемограмм спортсменов высокой квалификации / Т. И. Синельникова // Вестник ИМСИТа. – Краснодар: ИМСИТ, 2017. – №3 (71). – С. 42–44.

49. Синельникова, Т. И. Разработка численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них / Т. И. Синельникова // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2018 – Т.15, №2. – С. 12–18.

50. Синельникова, Т. И. Реализация методов системологии эпистемологического уровня порождающих систем / Т. И. Синельникова, Н. А. Швецова // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2016. – №5. – С. 209–211.

51. Синельникова, Т. И. Исследование влияния компонентов крови на вид заболевания на основе клинического анализа крови методами структурированных систем системологии / Т. И. Синельникова, Н. А. Швецова, С. А. Онищук // Фундаментальные исследования. – 2016. – №10 (3). – С. 566–570.

52. Синельникова, Т. И. Модификация метода структурированных систем Дж. Клира / Т. И. Синельникова, Н. А. Швецова // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – №10 (2). – С. 298–303.

53. Синельникова, Т. И. Инструментальное средство для создания структурированных систем / Н. А. Швецова, Т. И. Синельникова // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах: Труды VIII

Научной конференции молодых учёных и студентов. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2011. – С. 136–138.

54. Синельникова, Т. И. Инструментальное средство для поддержки принятия решений на уровне структурированных систем / Н. А. Швецова, Т. И. Синельникова // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах: Труды IX Научной конференции молодых учёных и студентов. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2012. – С. 187–189.

55. Швецова, Н. А. Методы системологии в системе поддержки принятия решений / Н. А. Швецова, Т. И. Синельникова // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – №11. – С. 136–137.

56. Синельникова, Т. И. Моделирование гемограмм методом структурированных систем / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Перспективы развития научных исследований: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Душанбе: Nəşriyyat «Vüsət», Нефтекамск: Мир науки, 2016. – Т.1. – С. 9–12.

57. Синельникова, Т. И. Исследование полиферативной активности клеток крови при дифференцировке методом структурированных систем / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Теория и практика научных исследований: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Астана: Баспасы «Академия», Нефтекамск: Мир науки, 2016. – Т.1. – С. 9–12.

58. Синельникова, Т. И. Сравнительный анализ гемограмм статистическими методами и методами системологии / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Новое слово в науке и образовании: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Минск: Выдавецтва «Навуковы свет», Нефтекамск: Мир науки, 2016. – Т.1. – С. 13–16.

59. Синельникова, Т. И. Использование метода структурированных систем для моделирования гемограмм / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Научная мысль XXI века: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Кишинев: Editura «Liceul», Нефтекамск: Мир науки, 2016. – Т.1. – С. 8–11.

60. Синельникова, Т. И. Принятие управленческих решений в экономике, сельском хозяйстве и медицине / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Приоритетные научные направления в XXI веке: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Прага: Vydavatel «Osvícení», Нефтекамск: Мир науки, 2016. – Т.1. – С. 12–15.

61. Синельникова, Т. И. Моделирование биологических систем на основе генограмм методом математического структурирования / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Достижения современной науки: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – София: Издателска Къща «СОРОС», Нефтекамск: Мир науки, 2016. – Т.1. – С. 35–38.

62. Синельникова, Т. И. Исследование генограмм спортсменов высшей квалификации методом структурирования систем данных / Т. И. Синельникова, С. А. Онищук // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах: Труды XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов. – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2016. – С. 18–21.

63. Scott Morton, M. S. Management Decision Systems: Computer-Based Support for Decision Making / M. S. Scott Morton. – Boston: Harvard University, 1971. – 216 p.

64. Keen, P. G. W. Decision Support Systems: An Organizational Perspective / P. G. W. Keen, M. S. Scott Morton. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1978. – 241 p.

65. Блюмин, С. Л. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности / С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова. – Липецк: ЛЭГИ, 2001. – 138 с.

66. Годин, В. В. Управление информационными ресурсами: 17-модульная программа для менеджеров «Управление развитием организации». Модуль 17 / В. В. Годин, И. К. Корнеев. – М.: Инфра-М, 2000. – 352 с.

67. Turban, E. Decision Support Systems and Intelligent Systems / E. Turban, J. E. Aronson, T. P. Liang. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2005. – 936 p.

68. Аксенов, К. А. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / К. А. Аксенов, Н. В. Гончарова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 104 с.

69. Bhargava, H. Decision Support Systems and Web Technologies: A Status Report / H. Bhargava, D. J. Power // Proceedings of the 2001 Americas Conference on Information Systems, Boston, MA, August 3-5. – 2001. – P. 229-235.

70. Salewicz, K. A. Development of a Web-based Decision Support System (DSS) for Managing Large International Rivers / K. A. Salewicz, M. Nakayama // Global Environmental Change. – 2004. – Vol. 14, No. 1. – P. 25–37.

71. Urbanavičiene, V. The web-based real estate multiple criteria negotiation decision support system: A new generation of decision support systems / V. Urbanavičiene, A. Kaklauskas, E. K. Zavadskas, M. Seniut // International Journal of Strategic Property Management. – 2009. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 267–286.

72. Dong, J. A framework of Web-based decision support systems for portfolio selection with OLAP and PVM / J. Dong, H. S. Du, S. Wang, K. Chen, X. Deng // Decision Support Systems. – 2004 (June). – Vol. 37, No. 3. – P. 367–376.

73. Power, D. J. Building Web-Based Decision Support Systems / D. J. Power, S. Kaparathi // Studies in Informatics and Control. – 2002. – Vol. 11, No. 4. – P. 291–302.

74. Аноп, М. Ф. Анализ техногенных рисков слабо формализованных систем / М. Ф. Аноп, Я. В. Катуева // Вестник ТОГУ. – 2012. – №4 (27). – С. 143–150.

75. Казиев, В. М. Введение в анализ, синтез и моделирование систем [Электронный ресурс] / В. М. Казиев. – М.: ИНТУИТ, 2016. – 270 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/52188.html> (дата обращения: 04.02.2017).

76. Сурмин, Ю. П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие для вузов / Ю. П. Сурмин. – Киев: МАУП, 2003. – 368 с.

77. Волкова, В. Н. Теория систем: учеб. пособие для вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – М.: Высш. шк., 2006. – 511 с.

78. Улыбин, А. В. Мультиагентный подход в имитационном моделировании / А. В. Улыбин, А. А. Арзамасцев // Вестник ТГУ. – 2010. – Т.15, Вып. 15. – С. 1470–1471.

79. Прокопчук, Ю. А. Синдромный принцип управления слабоформализованными системами и процессами / Ю. А. Прокопчук //

Індуктивне моделювання складних систем. – Киев: МННЦ ІТС НАНУ та МОНУ, 2011. – Вып. 3. – С. 152–164.

80. Смирнов, Э. А. Разработка управленческих решений: учеб. для вузов / Э. А. Смирнов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 271 с.

81. Ильясов, И. И. Система эвристических приемов решения задач / И. И. Ильясов. – М.: РОУ, 1992. – 140 с.

82. Райзберг, Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 495 с.

83. Глазунов, В. Н. Параметрический метод разрешения противоречий в технике (Методы анализа проблем и поиска решений в технике) / В. Н. Глазунов. – М.: Реч. трансп.: НТК «Метод», 1990. – 150 с.

84. Глинский, В. В. Статистический анализ: учеб. пособие для вузов / В. В. Глинский, В. Г. Ионин. – М.: ИНФРА-М; Новосибирск: Сибирское соглашение, 2002. – 241 с.

85. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

86. Андрейчиков, А. В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.

87. Hartwich, F. Setting research priorities: An example from agriculture using the Analytic Hierarchy Process / F. Hartwich, W. Janssen // Research Evaluation. – 2000. – Vol. 9, No. 3. – P. 201–210.

88. Srdjevic, Z. Modelling Multicriteria Decision Making Process for Sharing Benefits from the Reservoir at Serbia-Romania Border / Z. Srdjevic, B. Srdjevic // Water Resources Management. – 2014. – Vol. 28, No. 12. – P. 4001–4018.

89. Hummel, J. M. Technology assessment: the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) as a tool for multidisciplinary evaluation of blood pumps / J. M. Hummel, G. Rakhorst, W. van Rossum, G. J. Verkerke // Artificial Organs. – 1999. – Vol. 23, Iss. 7. – P. 619–632.

90. Daas, D. Developing a decision support system for business model design / D. Daas, T. Hurkmans, S. Overbeek, H. Bouwman // *Electron. Mark.* – 2013. – Vol. 23, No. 3. – P. 251–265.
91. Saaty, T. L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty // *International Journal of Services Sciences.* – 2008. – Vol. 1, No. 1. – P. 83–98.
92. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов / Н. Ш. Кремер. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.
93. Халафян, А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных / А. А. Халафян. – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.
94. Халафян, А. А. STATISTICA 6. Математическая статистика с элементами теории вероятностей / А. А. Халафян. – М.: Бином, 2010. – 496 с.
95. Плохинский, Н. А. Биометрия / Н. А. Плохинский. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 368 с.
96. Швецова, Н. А. Системный анализ и принятие решений: системный анализ: учеб. пособие / Н. А. Швецова. – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2008. – 99 с.
97. Кремер, Н. Ш. Эконометрика: учеб. для вузов / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко; под ред. Н. Ш. Кремера. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 328 с.
98. Елисеева, И. И. Эконометрика: учеб. для вузов / И. И. Елисеева, С. В. Курышева, Т. В. Костеева [и др.]; под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 576 с.
99. Кузнецов, А. В. Высшая математика: Математическое программирование: учеб. для вузов / А. В. Кузнецов, В. А. Сакович, Н. И. Холод; под общ. ред. А. В. Кузнецова. – Минск: Выш.шк., 1994. – 286 с.
100. Загребаев, А. М. Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем: учеб. пособие / А. М. Загребаев, Н. А. Крицына, Ю. П. Кулябичев, Ю. Ю. Шумилов. – М.: МИФИ, 2007. – 332 с.
101. Палий, И. А. Линейное программирование: учеб. пособие / И. А. Палий. – М.: Эксмо, 2008. – 254 с.

102. Rani, D. Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation / D. Rani, M. M. Moreira // *Water Resources Management*. – 2009. – Vol. 24, No. 6. – P. 1107–1138.

103. Карманов, В. Г. Математическое программирование: учеб. пособие / В. Г. Карманов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 264 с.

104. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау; пер. с англ. И. М. Быховской, В. Т. Вавилова; под ред. М. Л. Быховского. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

105. Костевич, Л. С. Математическое программирование: Информационные технологии оптимальных решений: учеб. пособие / Л. С. Костевич. – Минск: Новое знание, 2003. – 424 с.

106. Канторович, Л. В. Математическое оптимальное программирование в экономике / Л. В. Канторович, А. Б. Горстко. – М.: Знание, 1968. – 96 с.

107. Сигал, И. Х. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы: учеб. пособие / И. Х. Сигал, А. П. Иванова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 240 с.

108. Дроздов, Н. Д. Алгоритмы дискретного программирования: учеб. пособие / Н. Д. Дроздов. – Тверь: Изд-во ТвГУ, 2000. – 82 с.

109. Щербина, О. А. Методологические аспекты динамического программирования / О. А. Щербина // *Динамические системы*. – 2007. – Вып. 22. – С. 21–36.

110. Stedinger, J. R. Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization / J. R. Stedinger, B. F. Sule, D. P. Loucks // *Water Resources Research*. – 1984. – Vol. 20, No. 11. – P. 1499–1505.

111. Ермольев, Ю. М. Методы стохастического программирования / Ю. М. Ермольев. – М.: Наука, 1976. – 239 с.

112. Юдин, Д. Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д. Б. Юдин. – М.: Красанд, 2010. – 392 с.

113. Парахонский, А. П. Системологический подход к решению междисциплинарных задач / А. П. Парахонский // Успехи современного естествознания. – 2006. – №8. – С. 79–80.

114. Кирюшин, А. В. Методологические и практические аспекты построения исходной системы для анализа структуры природно-территориальных комплексов Республики Мордовия [Электронный ресурс] / А. В. Кирюшин // Современные проблемы территориального развития: электрон. журн. – 2017. – №1. – Режим доступа: <https://terjournal.ru/2017/id06/> (дата обращения: 28.09.2017).

115. Андрусевич, А. А. Отображение процесса изменения параметров РЭС на основе системологической модели / А. А. Андрусевич, И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова, Н. П. Демская // Системи обробки інформації. – 2014. – №8 (124). – С. 8–12.

116. Жарикова, И. В. Системологический подход при исследовании параметров РЭС / И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова // Технология приборостроения. – 2014. – №2. – С. 40–43.

117. Швецова, Н. А. Об исследовании сложных систем методами системологии / Н. А. Швецова, Г. В. Швецов // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2006. – С. 159–160.

118. Евгеньев, Г. Б. Системология инженерных знаний: учеб. пособие для вузов / Г. Б. Евгеньев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 374 с.

119. Сорочинская, Н. К. Разработка алгоритмических и программных средств извлечения знаний из исследовательских отчетов систем большой размерности [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.11 / Сорочинская Наталия Константиновна. – М., 2011. – 165 с.

120. Малин, А. С. Исследование систем управления: учеб. для вузов / А. С. Малин, В. И. Мухин. – М.: Изд-во ГУ ВШЭ, 2002. – 400 с.

121. Литвак, Б. Г. Разработка управленческого решения: учеб. для вузов / Б. Г. Литвак. – М.: Дело, 2002. – 392 с.

122. Петровский, А. Б. Теория принятия решений: учеб. для вузов / А. Б. Петровский. – М.: Академия, 2009. – 400 с.

123. Игнатъева, А. В. Исследование систем управления: учеб. пособие для вузов / А. В. Игнатъева, М. М. Максимцов – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. – 168 с.

124. Коротков, Э. М. Исследование систем управления: учеб. для вузов / Э. М. Коротков. – М.: ДеКА, 2000. – 130 с.

125. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: учеб. пособие для вузов / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. – М.: Высш. шк., 2004. – 616 с.

126. Миллер, Дж. А. Магическое число семь плюс или минус два: О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию / Дж. А. Миллер // Инженерная психология: Сборник статей: Пер. с англ. / Под ред. Д. Ю. Панова, В. П. Зинченко. – М.: Прогресс, 1964. – С. 192–225.

127. Ishizaka, A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitation / A. Ishizaka, A. Labib // University of Portsmouth ORInsight. – 2009. – Vol. 22, No. 4. – P. 201–220.

128. Подиновский, В. В. О некорректности метода анализа иерархий / В. В. Подиновский, О. В. Подиновская // Проблемы управления. – 2011. – №1. – С. 8–13.

129. Triantaphyllou, E. Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges / E. Triantaphyllou, S. H. Mann // International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice. – 1995. – Vol. 2, No. 1. – P. 35–44.

130. Середенко, Н. Н. Развитие метода анализа иерархий (МАИ) / Н. Н. Середенко // Открытое образование. – 2011. – №2. – С. 39–48.

131. Кветный, Р. Н. Принятие решений на основе прогнозирования временных рядов с двойной длинной памятью / Р. Н. Кветный, Л. Н. Мельник, В. Ю. Коцюбинский. – Palmarium Academic Publising, 2013. – 140 с.

132. Koong, K. S. A factor analysis of attributes affecting computing and information technology usage for decision making in small business / Kai S. Koong,

Lai C. Liu // International Journal of Computer Applications in Technology. – 1999. – Vol. 12, Nos. 2/3/4/5. – P. 81–89.

133. Микулина, Я. А. Статистические методы оценки вероятности банкротства предприятий нефтегазовой промышленности / Я. А. Микулина // Современные технологии поддержки принятия решений в экономике: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 28–31.

134. Асаул, А. Н. Управление затратами в строительстве / А. Н. Асаул, М. К. Старовойтов, Р. А. Фалтинский; под ред. А. Н. Асаула. – СПб: ИПЭВ, 2009. – 392 с.

135. Бородакий, Ю. В. Нелинейное программирование в современных задачах оптимизации: учеб. пособие / Ю. В. Бородакий, А. М. Загребаев, Н. А. Крицына, Ю. П. Кулябичев, Ю. Ю. Шумилов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 244 с.

136. Гребенникова, Н. Н. Оптимизация стратегии эксплуатации машин методом динамического программирования / Н. Н. Гребенникова / М-во образования и науки Росс. Федерации; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т, Волжский ин-т строительства и технологий (филиал) ВолгГАСУ. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. – 102 с.

137. Кремер, Н. Ш. Исследование операций в экономике: учеб. пособие для вузов / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко, И. М. Тришин, М. Н. Фридман; под ред. Н. Ш. Кремера. – М.: Из-во Юрайт; ИД Юрайт, 2013. – 438 с.

138. Попов, Э. В. Статические и динамические экспертные системы: учеб. пособие / Э. В. Попов, И. Б. Фоминых, Е. Б. Кисель, М. Д. Шапот. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 320 с.

139. Балтрашевич, В. Э. Реализация инструментальной экспертной системы / В. Э. Балтрашевич. – СПб.: Политехника, 1993. – 237 с.

140. Berner, E. S. Overview of Clinical Decision Support Systems / Eta S. Berner, Tonya J. La Lande // Clinical Decision Support Systems: Theory and Practice, 2nd ed. – N. Y.: Springer Science and Business Media, 2007. – P. 3–22.

141. Литвин, А. А. Система поддержки принятия решений в прогнозировании и диагностике инфицированного панкреонекроза / А. А. Литвин, О. Г. Жариков, В. А. Ковалев // Врач и информационные технологии. – 2012. – №2. – С. 54–63.

142. Duda, R. O. Expert Systems Research / R. O. Duda, E. H. Shortliffe // Science. – 1983. – Vol. 220, No. 4594. – P. 261–268.

143. Сотникова, К. Н. Экспертная система принятия решений для реконструкции зданий с учетом принципов «Зеленого строительства» / К. Н. Сотникова, Н. В. Колосова, А. П. Толмачев // Инженерные системы и сооружения. – Воронеж: ВГАСУ, 2012. – №1. – С. 98-105.

144. Якушев, А. А. Принятие управленческих решений на основе системного подхода и математического моделирования [Электронный ресурс] / А. А. Якушев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7936> (дата обращения: 10.06.2016).

145. Lee, T. Application of PDSS to improve the pricing efficiency of wholesale fish markets / T. Lee, J. Kao, C. Wu // Simulation Practice and Theory. – 2002. – Vol. 9, Iss. 6-8 – P. 241–253.

146. Muntermann, J. Towards Ubiquitous Information Supply for Individual Investors: A Decision Support System Design / J. Muntermann // Decision Support Systems. – 2009. – Vol. 47, No. 2. – P. 82–92.

147. Цветков, В. Я. Коррелятивный анализ в управлении / В. Я. Цветков // Математические методы и модели анализа и прогнозирования развития социально-экономических процессов черноморского побережья Болгарии: Материалы Международной научно-практической конференции. – Поморие, Болгария, 2012. – С. 266–269.

148. Alemu, E. T. Decision support system for optimizing reservoir operations using ensemble streamflow predictions / E. T. Alemu, R. N. Palmer, A. Polebitski, B. Meaker // Journal of Water Resources Planning and Management. – 2011. – Vol. 137, No. 1. – P. 72–82.

149. Лычкина, Н. Н. Динамическое имитационное моделирование развития социально-экономических систем и его применение в информационно-аналитических решениях для стратегического управления / Н. Н. Лычкина // Стратегия бизнеса, анализ-прогноз-управление. – 2013. – №2 (2). – С. 44–49.
150. Лычкина, Н. Н. Инновационные парадигмы и технологии имитационного моделирования и их применение в управлении и информационных бизнес-системах и системах поддержки принятия решений / Н. Н. Лычкина // Вестник ГУУ. – 2012. – №20. – С. 136–145.
151. Ильина, О. Н. Системный подход к управлению проектами в организации / О. Н. Ильина. – М.: Креативная экономика, 2012. – 208 с.
152. Shcherbina, O. Spatial Development Decision Making and Modeling / O. Shcherbina, E. Shembelyeva, J. Trušīņš // Scientific Journal of RTU. Series Sustainable Spatial Development. – 2010. – Vol. 1 (14). – P. 25–31.
153. Смородин, В. С. Система оперативного контроля имитации управляемых вероятностных технологических процессов / В. С. Смородин // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – №2 (49). – С. 37–42.
154. Пономарев, А. А. Защищенные системы в общей теории систем / А. А. Пономарев // Кибернетика и системный анализ. – 2006. – Т.42, №5. – С. 133–141.
155. Shannon, C. E. Communication Theory of Secrecy Systems / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28, No. 4. – P. 656–715.
156. Tinbergen, N. The Evolution of Behavior in Gulls / N. Tinbergen // Scientific American. – 1960. – Vol. 203, Iss. 6. – P. 118–130.
157. Советов, Б. Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
158. Борисов, Ю. П. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств / Ю. П. Борисов, В. В. Цветнов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
159. Крепша, Н. В. Экология. Общая, социальная, прикладная: учеб. пособие / Н. В. Крепша. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 149 с.

160. Дулепов, В. И. Системная экология: учеб. пособие / В. И. Дулепов, О. А. Лескова, И. С. Майоров. – Владивосток: ВГУЭС, 2004. – 252 с.

161. Афоничкин, А. И. Управленческие решения в экономических системах: учеб. для вузов / А. И. Афоничкин, Д. Г. Михаленко. – СПб.: Питер, 2009. – 480 с.

162. Гиг, Дж. ван. Прикладная общая теория систем: в 2-х кн.: Кн. 1 / Дж. ван Гиг. – М.: Мир, 1981. – 336 с.

163. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара; пер. с англ. под ред. И. Ф. Шахнова; предисл. Г. С. Поспелова. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

164. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара; пер. с англ. Э. Л. Наппельбаума; под ред. С. В. Емельянова. – М.: Мир, 1978. – 311 с.

165. Ризниченко, Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии / Г. Ю. Ризниченко. – М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2011. – 560 с.

166. Синельникова, Т. И. Программа предварительной обработки эмпирического массива данных для систем принятия решений на основе методов системологии в области слабоструктурированных задач / Т. И. Синельникова, Н. А. Швецова // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611326; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.01.2016 г.

167. Синельникова, Т. И. Программный модуль поиска оптимальной структуры сложной системы / Т. И. Синельникова, Н. А. Швецова // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618132; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.07.2015 г.

168. Краснощеков, П. С. Принципы построения моделей / П. С. Краснощеков, А. А. Петров. – М.: МГУ, 1983. – 264 с.

169. Синельникова, Т. И. Программа выбора оптимального набора существенных характеристик исследуемого сложного объекта на основе нечетких

мер системологии / Т. И. Синельникова, Н. А. Швецова // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660456; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.09.2016 г.

170. Паничев, В. В. Компьютерное моделирование: учеб. пособие / В. В. Паничев, Н. А. Соловьев. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 130 с.

171. Wooley, P. S. Identifying Cloud Computing Security Risks / Paul S. Wooley // Applied Information Management Program, University of Oregon, Feb. 2011. – 88 p.

172. Смородин, В. С. Синтез структуры технологического цикла методом пошаговой реструктуризации / В. С. Смородин, В. А. Короткевич, А. В. Клименко, В. Л. Мережа // Доклады БГУИР. – 2011. – №2 (56). – С. 70–76.

173. Максимей, И. В. Интеллектуальное имитационное моделирование динамических систем / И. В. Максимей, В. С. Смородин, В. А. Короткевич, А. В. Клименко // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 247–255.

174. Шлее, М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 928 с.

175. Саммерфилд, М. Qt. Профессиональное программирование. Разработка кроссплатформенных приложений на C++ / М. Саммерфилд; пер. с англ. А. Слинкина. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 560 с.

176. Бланшет, Ж. Qt 4: программирование GUI на C++ / Ж. Бланшет, М. Саммерфилд; пер. с англ. С. Лунина, В. Казаченко. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. – 736 с.

177. Джосьютис, Н. C++. Стандартная библиотека. Для профессионалов / Н. Джосьютис. – СПб.: Питер, 2004. – 730 с.

178. Назаренко, Г. И. Клиническая оценка результатов лабораторных исследований / Г. И. Назаренко, А. А. Кишкун. – М.: Медицина, 2006. – 544 с.

179. Галеева, А. В. Клинический анализ крови в практике врача-педиатра / А. В. Галеева, Э. А. Гайнуллина // Практическая медицина. – 2009. – №39. – С. 16–21.

180. Кишкун, А. А. Руководство по лабораторным методам диагностики / А. А. Кишкун. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 800 с.

Приложение А

Копии документов, подтверждающих использование результатов диссертационной работы



АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации на тему:
«Исследование и разработка инструментальных средств для поддержки принятия решений
на уровне информационных структурированных систем»
Синельниковой Татьяны Ибрагимовны
в учебном процессе на физико-техническом факультете
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы
«Исследование и разработка инструментальных средств для поддержки принятия решений
на уровне информационных структурированных систем», достигнутые на кафедре
теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного
университета, используются в учебном процессе при чтении лекций и проведении
практических занятий для студентов 4 курса очной формы обучения, направления
подготовки: 09.03.02 Информационные системы и технологии по учебным дисциплинам:
«Системология»; «Теория принятия решений».

Применение разработанного в рамках диссертационной работы программного
комплекса позволяет:

- 1) Проводить лабораторные работы по следующим темам: а) Порождающие системы системологии; б) Структурированные системы системологии; в) Принятие решений на основе нечетких мер.
- 2) Проводить оценку подготовки и выполнения лабораторных работ студентами по указанным темам.
- 3) Использовать результаты работы программного комплекса в качестве наглядного пособия для решения задач математическими методами порождающих и структурированных систем системологии на лекционных занятиях.
- 4) Проверять результаты, полученные студентами на практических занятиях.

Внедрение в учебный процесс результатов диссертационной работы Синельниковой Т.И. позволило повысить качество подготовки бакалавров и магистров по соответствующему направлению подготовки.

И.о. декана физико-технического факультета,
д.ф.-м.н., профессор

Г.Ф. Копытов

Заведующий кафедрой теоретической
физики и компьютерных технологий,
д.ф.-м.н., доцент

В.А. Исаев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
«СЕЛЕНА»

350072 • Краснодар • Московская • 81
телефон • факс: (861)-257-05-57
www.kbselena.ru
E-mail: mail@kbselena.ru
ИНН 2311085868

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «КБ

«Селена»

А.Э. Волошин

2018 г.



Для представления
в диссертационный совет Д 212.038.20
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Воронежский государственный
университет»

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационной работы
«Исследование и разработка инструментальных средств для поддержки
принятия решений на уровне информационных структурированных систем»
Синельниковой Татьяны Ибрагимовны, представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Комиссия в составе:

Председатель – генеральный директор АО «КБ «Селена»

и членов комиссии:

начальник бюро патентования и научно-технической информации
(БПНТИ), к.ф.-м.н. Куликов О.Н., методист филиала «Интегрированные
радиоэлектронные и оптические инфокоммуникационные системы и

технологии (ИРиОИКСиТ) кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета (КубГУ) в АО «КБ «Селена», Бродова М.М.,

настоящим актом подтверждает, что в АО «КБ «Селена» в разработках внедрены и используются следующие научно-теоретические и практические результаты кандидатской диссертации Синельниковой Т.И.:

1) Модифицированный численный метод структурированных систем, который позволяет определить значимые переменные системы, производить декомпозицию и агрегирование систем, прогнозировать состояние системы и принимать оптимальные управленческие решения относительно сложных систем.

2) Численный алгоритм генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, позволяющий сформировать и произвести выбор оптимальных вариантов систем указанного уровня с учетом: вида информации, типа системы (нейтральная, направленная), уровня сложности искомой порождающей системы, направления движения по матрице данных (предсказание, определение прошлых состояний).

3) Программная реализация классов моделей-представлений для обработки и отображения больших массивов эмпирических данных.

4) Автоматизированный программный комплекс, состоящий из программных модулей поиска глубинных связей, построения полной системы и поиска оптимальных порождающих систем, реализующий математические модели исходной, порождающей и структурированной систем.

Указанные результаты диссертационной работы Синельниковой Т.И. использовались при проектировании и разработке систем связи, исследовании систем автоматизации и контроля.

Разработанные численные метод и алгоритмы, а также реализованный программный комплекс позволили: оптимизировать структуру модели радиоаппаратуры за счет ее оптимальной декомпозиции и сокращения числа

элементов и связей; осуществить выбор наиболее значимых параметров систем связи для дальнейших испытаний и анализа возможных дефектов, а также последующего мониторинга функционирования; повысить эффективность корректировки и принятия конструкторских решений посредством компьютерной обработки на их основе данных, полученных в результате испытаний радиоаппаратуры.

Внедрение результатов диссертации Синельниковой Т.И. позволило сократить в 5–6 раз время решения прикладных задач синтеза в рамках комплекса макетов систем связи на основе моделирования радиоаппаратуры (с числом исходных состояний от 32 и выше), по сравнению со статистическими программными пакетами и модулями, применяемыми ранее.

Председатель комиссии:

Генеральный директор АО «КБ «Селена»

_____ А.Э. Волошин

« 15 » марта 2017 г

Члены комиссии:

Начальник БПНТИ,

кандидат физико-математических наук

_____ Куликов О.Н.

Методист филиала ИРиОИКСиТ

кафедры оптоэлектроники КубГУ

в АО «КБ «Селена»

_____ Бродова М.М.

Приложение Б

Фрагмент программной реализации.

Программная функция базовой процедуры соединения

```

void ModuleWindow::basic_proc(int ref_level)
{
    QWidget *page = new QWidget(sbox);
    QGridLayout *gridLayoutPage = new QGridLayout(page);
    gridLayoutPage->setSpacing(5);
    gridLayoutPage->setContentsMargins(2, 2, 2, 2);
    QTabWidget *tabs_ps = new QTabWidget(page);
    gridLayoutPage->addWidget(tabs_ps, 0, 0, 1, 1);
    tabs_ps->setCurrentIndex(0);
    sbox->addTab(page, "Степень уточнения "+QString::number(ref_level+1));
    int iset = rg[ref_level].size();
    float min_dist = 0.0;
    int cont=0;
    for (int i=0; i<iset; ++i) {
        QWidget *widget_iset = new QWidget(tabs_ps);
        widget_iset->setStatusTip("Данная вкладка содержит набор подсистем №
        "+QString::number(i+1)+" степени уточнения "+QString::number(ref_level+1)+" и
        их несмещённую реконструкцию");
        tabs_ps->addTab(widget_iset, "Набор подсистем № "+QString::number(i+1));
        QGridLayout *gridLayoutIset = new QGridLayout(widget_iset);
        QSplitter *splitter = new QSplitter(widget_iset);
        splitter->setOrientation(Qt::Vertical);
        QWidget *widgetSplit = new QWidget(splitter);
        QHBoxLayout *hLayout = new QHBoxLayout(widgetSplit);
        hLayout->setSizeConstraint(QLayout::SetMaximumSize);
        hLayout->setContentsMargins(0, 0, 0, 0);
        splitter->addWidget(widgetSplit);
        gridLayoutIset->addWidget(splitter, 0, 0, 1, 1);
        TableModel *table = new TableModel();
        QVector<TableModel *> temp_vec;
        QVector<element>::iterator it_all_el;
        for (it_all_el=all_elements.begin(); it_all_el!=all_elements.end();
        ++it_all_el) {
            if (it_all_el->number_split == ref_level) {
                if (it_all_el->number_set == i) {
                    temp_vec.push_back(it_all_el->table);
                }
            }
        }
        Analysis result;
        result.number_split = ref_level;
        result.number_set = i;
        result.distance = 0.0;
        QVector<TableModel *>::iterator it_temp_vec;
        for (it_temp_vec=temp_vec.begin(); it_temp_vec!=temp_vec.end();
        ++it_temp_vec) {
            QTableView *tbv = new QTableView(widgetSplit);
            tbv->setAlternatingRowColors(true);
            tbv->setMaximumHeight(250);
            tbv->setModel(*it_temp_vec);
            tbv->resizeColumnsToContents();
            tbv->resizeRowsToContents();
            tbv->setEditTriggers(QAbstractItemView::SelectedClicked);
            hLayout->addWidget(tbv);
        }
    }
}

```

```

}
elem_syst_build_res.resize(rg[ref_level][i].size());
for (int p=0; p<elem_syst_build_res.size(); ++p) {
    elem_syst_build_res[p] = rg[ref_level][i][p];
}
abc.clear(); defineABC();
int count_var = value_param_from_build.size();
table->setColumnCount(count_var);
for (int k=0; k<count_var; ++k) {
    table->setColumnName(k, QString("v%1").arg(k+1));
}
table->setRowCount(struct_system->rowCount());
for (int k=0; k<struct_system->rowCount(); ++k) {
    for (int l=0; l<struct_system->columnCount(); ++l) {
        table->setItem(k,l,struct_system->item(k,l)->text());
    }
}
int procent_ = 0;
QString ab="", bc="";
int t=1;
QString hcaption = "1f";
float sdegree = 1.0;
for (int j=0; j<abc[0].size(); ++j) {
    verojt.clear();
    table->setColumnCount(table->columnCount(QModelIndex()+1);
    hcaption.prepend("(" + QString::number(j+2) + "f*"); hcaption.append(")");
    table->setColumnName(table->columnCount(QModelIndex())-1, hcaption);
    ab = abc[0][j]+abc[1][j]; bc = abc[1][j]+abc[2][j];
    qSort(ab.begin(), ab.end()); qSort(bc.begin(), bc.end());
    for (int k=0; k<table->rowCount(QModelIndex()); ++k) {
        ++procent_;
        TableModel* temp = temp_vec[j+t];
        for (int l=0; l<temp->rowCount(QModelIndex()); ++l) {
            bool p = true;
            for (int n=0; n<ab.length(); ++n) {
                if (temp->item(l, n) != table->item(k,
                    QString(ab[n]).toInt())) {
                    p = false;
                }
            }
            if (p == true) {
                verojt.push_back(temp->item(l, temp->
                    columnCount(QModelIndex())-1).toFloat());
            }
        }
        float denom = 0.0;
        if (j == 0) {
            temp = temp_vec[j];
            for (int l=0; l<temp->rowCount(QModelIndex()); ++l) {
                bool p = true;
                for (int n=0; n<bc.length(); ++n) {
                    if (temp->item(l, n) != table->item(k,
                        QString(bc[n]).toInt())) {
                        p = false;
                    }
                }
                if (p == true) {
                    verojt[k] *= temp->item(l, temp->
                        columnCount(QModelIndex())-1).toFloat();
                }
            }
            p = true;
        }
    }
}

```

```

        for (int n=0; n<abc[1][j].length(); ++n) {
            if (temp->item(l, bc.indexOf(abc[1][j][n])) != table->
                item(k, QString(abc[1][j][n]).toInt())) {
                p = false;
            }
        }
        if (p == true) {
            denom += temp->item(l, temp->columnCount(QModelIndex())-
                1).toFloat();
        }
    }
} else {
    verojt[k]*=table->item(k, table->columnCount(QModelIndex())-
        2).toFloat();
    for (int l=0; l<table->rowCount(QModelIndex()); ++l) {
        bool p = true;
        for (int n=0; n<abc[1][j].length(); ++n) {
            if (table->item(l, QString(abc[1][j][n]).toInt()) !=
                table->item(k, QString(abc[1][j][n]).toInt())) {
                p = false;
            }
        }
        if (p == true) {
            denom += table->item(l, table->
                columnCount(QModelIndex())-2).toFloat();
        }
    }
}
if (denom != 0) {
    verojt[k]/=(denom*sdegree);
} else {
    Error *w_err = new Error();
    sbx->setCurrentIndex(ref_level);
    tabs_ps->setCurrentIndex(tabs_ps->count()-1);
    w_err->setText("Переопределите структурированную
        систему.\nПроцедура соединения не выполнена.");
    gridLayoutISet->addWidget(w_err, 0, 0, 1, 1);
    table->clear();
    verojt[k] = 0;
    error_distance=true;
    return;
}
}
for (int k=0; k<table->rowCount(QModelIndex()); ++k) {
    table->setItem(k, table->columnCount(QModelIndex())-1,
        QString::number(verojt[k], 'f', 7));
}
sdegree =
    (pow(2, (abc[0][j]+abc[1][j]+abc[2][j]).length()))/(pow(2, count_var));
}
bool iter_proc = false;
QString perem_subsys = "";
int count_=0; float dcompare=0.0;
for (int j=0; j<abc[0].size(); ++j) {
    if (count_ == 0) {
        perem_subsys = abc[1][j]+abc[2][j];
        --j;
    } else {
        perem_subsys = abc[0][j]+abc[1][j];
    }
}
qSort(perem_subsys.begin(), perem_subsys.end());

```



```

for (int l=0; l<temp_vec[count_]->rowCount(QModelIndex()); ++l) {
    for (int m=0; m<table->rowCount(QModelIndex()); ++m) {
        bool p = true;
        for (int n=0; n<perem_subsys.length(); ++n) {
            if (table->item(m, QString(perem_subsys[n]).toInt()) !=
                temp_vec[count_]->item(l, n)) {
                p = false;
            }
        }
        if (p == true) {
            dcompare+=table->item(m, table->columnCount(QModelIndex())-
                1).toFloat();
        }
    }
    if (qAbs(dcompare-temp_vec[count_]->item(l, temp_vec[count_]->
        columnCount(QModelIndex())-1).toFloat()) > delta) {
        iter_proc = true;
        break;
    }
    dcompare = 0;
}
if (iter_proc == true) break;
++count_;
}
QTableView *tableIter = new QTableView(splitter);
tableIter->setAlternatingRowColors(true);
splitter->addWidget(tableIter);
if (iter_proc == true) {
    max_iter = false;
    if (iterProc(table, temp_vec)) result.distance = distance(table);
    else
    {
        Error *w_err = new Error();
        if (max_iter) w_err->setText("Несмещенная реконструкция не
            найдена!");
        else w_err->setText("Определение набора остановлено. Процедура
            соединения не выполнена.");
        sbox->setCurrentIndex(ref_level);
        tabs_ps->setCurrentIndex(tabs_ps->count()-1);
        gridLayoutISet->addWidget(w_err, 0, 0, 1, 1);
    }
} else {
    result.distance = distance(table);
}
temp_vec.clear();
tableIter->setModel(table);
tableIter->resizeColumnsToContents();
tableIter->resizeRowsToContents();
tableIter->setEditTriggers(QAbstractItemView::SelectedClicked);
vec_dist.push_back(result);
if (i!=0) {
    if (result.distance<min_dist) {
        min_dist = result.distance;
        cont = i;
    }
} else {
    min_dist = result.distance;
}
}
distances->tbw->setHorizontalHeaderItem(0, new QTableWidgetItem("Наборы"));
distances->tbw->setHorizontalHeaderItem(1, new QTableWidgetItem("Расстояния"));

```

```

error_distance = false;
int nrow = 0;
for (int i=0; i<rg[ref_level].size(); ++i) {
    if (vec_dist[i].number_split==ref_level) {
        nrow = distances->tbw->rowCount();
        distances->tbw->setRowCount(nrow+1);
        distances->tbw->setVerticalHeaderItem(nrow, new QTableWidgetItem("Степень
        уточнения "+QString::number(ref_level+1)));
        QString text_ = "";
        for (int l=0; l<rg[ref_level][i].size(); ++l) {
            text_ += QString::number(rg[ref_level][i][l].toInt()+
            QString("").fill('1',rg[ref_level][i][l].length()).toInt())+" / ";
        }
        text_.chop(3);
        distances->tbw->setItem(nrow, 0, new QTableWidgetItem(text_));
        if (QString::number(vec_dist[i].distance)!=QString("nan") && i==cont) {
            distances->tbw->setItem(nrow, 1, new
            QTableWidgetItem(QString::number(vec_dist[i].distance,'f',7)+"**"));
            distances->tbw->item(nrow, 1)->
            setBackground(QBrush(QColor(100,235,100)));
        } else {
            distances->tbw->setItem(nrow, 1, new
            QTableWidgetItem(QString::number(vec_dist[i].distance,'f',7)));
        }
        ++nrow;
    }
    if (QString::number(vec_dist[i].distance) == QString("nan")) {
        error_distance = true;
    }
}
int col_in_ref = rg[ref_level].size();
if (ref_level>1 && rg[ref_level].size()>1) {
    float valid_value =
        vec_dist[cont].distance+(vec_dist[cont].distance*procent/100);
    for (int k=0; k<vec_dist.size(); ++k) {
        if (k!=cont && vec_dist[k].distance<=valid_value) {
            distances->tbw->setItem(distances->tbw->rowCount()-col_in_ref+k,1,new
            QTableWidgetItem(distances->tbw->item(distances->tbw->rowCount()-
            col_in_ref+k,1)->text()+"**"));
            distances->tbw->item(distances->tbw->rowCount()-col_in_ref+k,1)->
            setBackground(QBrush(QColor(235,100,100)));
        }
    }
    for (int k=0; k<vec_dist.size(); ++k) {
        if (vec_dist[k].distance>valid_value) {
            rg[ref_level].remove(k);
            vec_dist.remove(k);
            --k;
        }
    }
}
vec_dist.clear();
dist->setEnabled(true);
if (valuesOfParams.size() && !error_distance) report->setEnabled(true);
distances->tbw->resizeRowsToContents();
distances->tbw->resizeColumnsToContents();
}

```

Приложение В

Копии свидетельств о государственной регистрации программ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2015618132

**Программный модуль поиска оптимальной структуры
сложной системы**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Кубанский государственный университет» (ФГБОУ
ВПО «КубГУ») (RU)*

Авторы: *Синельникова Татьяна Ибрагимовна (RU),
Швецова Наталия Анатольевна (RU)*

Заявка № **2015614704**
Дата поступления **04 июня 2015 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **31 июля 2015 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



 Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016611326

Программа предварительной обработки эмпирического массива данных для систем принятия решений на основе методов системологии в области слабоструктурированных задач

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «КубГУ»)* (RU)

Авторы: *Синельникова Татьяна Ибрагимовна (RU), Швецова Наталья Анатольевна (RU)*

Заявка № 2015661848

Дата поступления 02 декабря 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 января 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016660456

Программа выбора оптимального набора существенных характеристик исследуемого сложного объекта на основе нечетких мер системологии

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «КубГУ») (RU)*

Авторы: *Синельникова Татьяна Ибрагимовна (RU), Швецова Наталия Анатольевна (RU)*

Заявка № **2016617869**

Дата поступления **19 июля 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **15 сентября 2016 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

