

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

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

Официальные оппоненты: Барулина Марина Александровна,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем точной
механики и управления Российской академии
наук, лаборатория анализа и синтеза
динамических систем в прецизионной механике,
ведущий научный сотрудник

Раецкая Елена Владимировна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова», автомобильный факультет,
кафедра математики, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени
М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится «30» января 2019 года в 15 час. 10 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.038.20 при ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж,
Университетская пл., 1, главный корпус, ауд. 333.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке
Воронежского государственного университета, а также на сайте
<http://www.science.vsu.ru/dissertations/6529/>
Диссертация_Синельникова_Т.И..pdf

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
доцент

Шабров Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. К настоящему времени развито моделирование различных процессов во многих научных областях, в том числе в экономике, социологии, политологии, психологии, истории, географии. 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. 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. 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, Л. Берталанфи, А. Рапопорта, У. Р. Эшби, К. Боулдинга, Н. Винера, о междисциплинарном характере которых говорит сфера интересов их авторов. В них рассматриваются: типы отношений между элементами систем, а не типы составляющих их элементов; свойства струк-

туры 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.

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 R между ними. После преобразования состояний исследуемых свойств к конкретным переменным $A \rightarrow \hat{V}$, а от них к обобщенным $\hat{V} \rightarrow V$, 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.

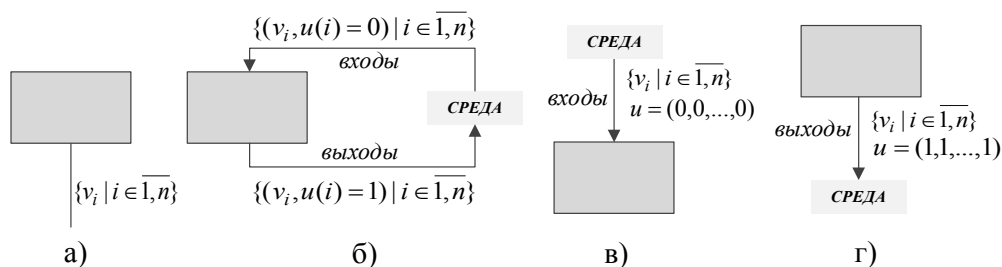


Рисунок 2 – Типы исходных систем

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), 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 (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.

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 ис-

пользования в решении междисциплинарных задач, 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.

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 искомых 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.

Теоретическая и практическая значимость результатов проведенных исследований. 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.

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 конференциях: VIII Научная конференция молодых учёных и студентов «Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах» (г.Краснодар, 2011г.); IX Научная конференция молодых учёных и студентов «Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах» (г.Краснодар, 2012г.); VI Международная научно-практическая конференция «Экономика знаний: проблемы управления формированием и развитием» (г.Краснодар, 2014г.); V международная научно-практическая конференция «Академическая наука – проблемы и достижения» (North Charleston, USA, 2014г.); VI международная научно-практическая конференция «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки» (North Charleston, USA, 2015г.); Междуна-

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

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 [1-2, 6, 9-12, 21] выполнены автором самостоятельно. Из совместных работ [3-5, 7-8, 13-20], [22-24] в диссертацию вошли результаты, принадлежащие лично диссертанту.

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, определены его цель и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ особенностей неоднородных слабоформализованных систем с динамической структурой, средств и методов принятия решений в области их исследования. Максимальный учет особенностей данных систем достигается применением методов системологии Клира, центральное место в которой занимает иерархия эпистемологических уровней. Моделирование систем начинается с формализации системы объекта: $O = \langle \{(a_i, A_i) | i \in N_n\}, \{(b_j, B_j) | j \in N_m\} \rangle$, где a_i – свойство; A_i – множество проявлений a_i ; b_j – база; B_j – множество элементов b_j ; $N_n = \{1, 2, \dots, n\}$; $N_m = \{1, 2, \dots, m\}$. Каналы наблюдения свойств a_i (баз b_j) дают конкретные переменные \dot{v}_i (параметры \dot{w}_j), входящие в конкретную представляющую систему I , канал абстрагирования позволяет привести их к обобщенному виду, по аналогии с системой объекта они составляют общую представляющую систему I с множеством переменных $V' = \{v_i | i \in N_n\}$ и множеством параметров $W' = \{w_j | j \in N_m\}$. Описание систем на нулевом уровне (уровне исходных систем) сводится к определению совокупности системы объекта, общей и конкретной представляющих систем, полного канала наблюдения и канала конкретизации/абстрагирования. Исходные системы за счет взаимодействия составляющих их компонентов обеспечивают связь с предметной областью и являются источником данных содержательного уровня, абстрактных понятий и их интерпретации.

Переход к первому уровню включает определение системы данных: $D = (I, d)$, где $d: W \rightarrow V$ – функция, ставящая в соответствие каждому значению полного параметра из множества W одно полное состояние переменных из множества V .

На втором уровне (систем с поведением) вводятся инвариантные на W' ограничения, общие для переменных, полученных от применения параметрических правил сдвига, определяемых функцией: $r_j: W \rightarrow W$, которая каждому значению параметра из W ставит в однозначное соответствие другое значение из W . Результатом применения набора \mathcal{R} правил сдвига является множество выборочных переменных $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, $k \in N_q$, которые определяются маской – 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 s_k при значении параметра $w_j \in W'$. Системы с поведением порождающие определяются тройкой: $F_{GB} = (I, M_G, f_{GB})$, 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 $M_G = \langle M, M_e, M_{\bar{e}} \rangle$, где M_e – подмаска, определенная на входных переменных $e \subset E, E \subset V'$, $M_{\bar{e}} = M_g \cup M_{\bar{g}}$); $f_{GB}: \bar{\mathbf{G}} \rightarrow \mathbf{G}$ – выражает метод определения состояний порождаемых переменных $\mathbf{g} \in \mathbf{G}$ из состояний порождающих переменных $\bar{\mathbf{g}} \in \bar{\mathbf{G}}$, $\mathbf{g} = f(\bar{\mathbf{g}})$ (для направленных систем $f_{GB}: \mathbf{E} \times \bar{\mathbf{G}} \rightarrow \mathbf{G}$).

Путем последовательной формализации в диссертационной работе осуществляется абстрагирование конкретных систем из содержательных задач с сохранением семантики, свойственной предметной области. Решение задач, возникающих при изучении систем, связано с их математическим моделированием на вышестоящих эпистемологических уровнях и исследованием полученных моделей посредством реконструктивного анализа.

Во **второй главе** рассмотрены возможности применения методов системологии для анализа сложных систем; ввиду недостатков, связанных с критическим ростом объема вычислительной обработки, осуществлено развитие математического обеспечения решения системных задач на их основе. Проведено построение математических моделей второго и третьего уровней (порождающих и структурированных систем).

Порождающая система должна включать способ перехода от состояний переменных к значениям функции, определяющей параметрически инвариантные на множестве переменных ограничения, так, ее математическая модель имеет следующий вид:

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

где v_i – i -ая переменная системы; V_i – множество состояний i -ой переменной; φ – функция, ставящая 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.

В работе дана математическая формулировка задачи поиска оптимальных систем второго уровня при порождении состояний переменных путем применения ограничения M :

$$\begin{cases} M \supset^k M_G, k \in N_q, \\ \{^k GS_M = \langle D, ^k F_{GB} = (I, ^k M_G, ^k f_{GB}) \rangle\}, \\ H_{\min} \rightarrow \min_k H(^k f_{GB}(c, \mathbf{e}, \bar{\mathbf{g}}, \mathbf{g})). \end{cases} \quad (1)$$

Предложенная постановка задачи включает вычисление порождающей нечеткости H – шенноновской энтропии с множествами выходов C, E, G, \bar{G} и распределениями вероятностей, представленными соответствующими функциями (для возможностей систем вычисляется U -нечеткость). 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 ${}^k M_G$. Математический аппарат порождающих систем использован для определения оптимального представления данных с точки зрения пространственных связей для дальнейшего исследования систем и выбора их существенных свойств, а также возможного порождения состояний переменных системы, например, в случае малой эмпирической базы исследования, осложняющей оценку взаимосвязей элементов системы с достаточной надежностью.

В целях обеспечения применения методов реконструктивного анализа осуществлено численное моделирование систем третьего эпистемологического уровня (структурированных систем). Структурированная система S представляет собой объединение элементов ${}^x ES$, в качестве которых выступают однотипные системы нижестоящих уровней – I, D, GS , взаимодействующие между собой. Каждый ${}^x ES$ должен удовлетворять следующим требованиям: 1) определен на общем параметрическом множестве; 2) имеет общие переменные хотя бы с одним элементом. Построение S также связано с формированием *полной системы*: $S_F = \langle V', V, \varphi, C, f \rangle$, которая включает все переменные из элементов системы S и неразрывно с ней связана. В таком контексте ${}^x ES$ выступают подсистемами S_F . В работе математическая модель структурированной системы была представлена в виде:

$$S = \{ {}^x GS \mid x \in N_q \}, \quad (2)$$

при этом каждый элемент ${}^x GS \in S$ связан с S_F следующими соотношениями:

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

Близость двух сопоставимых систем определяется как потеря информации при замене f на f_S . Количество информации относительно полной системы S_F (либо заданной системы GS), потерянной в реконструктивной гипотезе S , вычисляется на основе информационного расстояния, для вероятностных систем по формуле:

$$\mu(f, f_S) = \frac{1}{\log_2 |C|} \sum_{c \in C} f(c) \log_2 \frac{f(c)}{f_S(c)}, \quad (3)$$

где $f(c), f_S(c)$ – вероятности состояний $c \in C$ переменных оригинальной системы и ее реконструкции, полученной из гипотезы S ; f, f_S – соответствующие распределения вероятностей; $\frac{1}{\log_2 |C|} = const$ – нормирующий коэффициент, обеспечивающий

выполнение условия: $0 \leq \mu(f, f_S) \leq 1$.

Для возможностей систем:

$$\hat{\mu}(f, f_S) = \frac{1}{\log_2 |C|} \int_0^1 \log_2 \frac{|c(f_S, l)|}{|c(f, l)|} dl. \quad (4)$$

В целях реализации и применения аппарата порождающих систем создан численный алгоритм генерации указанных систем и поиска оптимальных из них. При формировании порождающих систем путем применения ограничения M к системе данных (1), маска может выступать в качестве представителя системы, при этом она

должна удовлетворять требованиям эпистемологического уровня, а также требованию содержания наибольшего количества информации об исходной системе с учетом значения уровня сложности и порождающей нечеткости. Для решения задачи (1) поиска оптимальных систем алгоритм включает исследование всех содержательных подмасок заданной наибольшей допустимой маски. Произведен переход от принятого пространственного представления маски к транспонированной матрице $M' = M^T$, которая задействуется в программной реализации при обработке данных (в численном алгоритме для простоты изложения M' обозначена через M). Созданный численный алгоритм поиска оптимальных порождающих систем состоит из следующих 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:

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

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 диссертационной работы 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 $Y = \{y | y \in \mathbb{Z}, 0 \leq y \leq i\}$, 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.

Приведенный алгоритм позволяет осуществить поиск оптимальных порождающих систем (в том числе на отдельных уровнях сложности) для подъема к уровню структурированных систем, содержание которого составляют методы реконструктивного анализа. Однако для уровня структурированных систем характерен критический рост объема вычислительной обработки гипотез, кроме того, в исходном виде математический аппарат этого уровня не включает учет значимости переменных в составе системы с позиции целей исследования, а в алгоритмах имеются недостатки, препятствующие их программной реализации. В диссертационной работе разрешение проблем, выявленных на данном уровне при решении системных задач, осуществляется путем разработки и применения модифицированного численного метода структурированных систем, модификации алгоритмов решения задач реконструкции и идентификации.

Так как построение структурированной системы связано с формированием системы S_F , осуществим учет оценки близости реконструктивной гипотезы к соответствующей полной системе, выражаемой через информационное расстояние μ . Выделим из множества свойств системы, представленных множеством переменных 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 (2), записав ее в следующем виде:

$$\hat{S} = \{ {}^xGS_M = \langle ({}^xV', {}^xV, {}^xW', {}^xW), d: {}^xW \rightarrow {}^xV \rangle, {}^xF_{GB} = ({}^xI, {}^xM_G, {}^xf_{GB}) \mid x \in N_q, \hat{V} \subset \bigcup_{x \in N_q} {}^xV', \mu \}, \quad (5)$$

где $v_i \in \hat{V}$ – выделенные целевые переменные; μ – значение информационного расстояния, соответствующего структурированной системе.

Модификация метода структурированных систем направлена на реализацию созданной расширенной математической модели и повышение эффективности численного исследования систем при реконструктивном анализе.

На начальном этапе проведена модификация общего алгоритма численного метода структурированных систем, вследствие которой он состоит из следующих шагов: **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 ре-

шесток уточнения; **9)** если дальнейшее уточнение возможно, перейти на шаг 4; **10)** вывод на основе реконструктивного анализа.

Для реализации наборов процедур в составе модифицированного метода, а также уменьшения объема вычислений путем сокращения числа реконструктивных гипотез, с сохранением упорядочения решеток по степени уточнения, разработан модифицированный численный алгоритм RG -процедуры. В соответствии с предложенной математической моделью (5) в рассмотрение включены целевые переменные (при этом мощность множества целевых переменных меньше мощности множества элементов решеток уточнения, а переменные системы выражаются их идентификаторами). Модифицированный численный алгоритм RG -процедуры включает следующие шаги:

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;

б) конец.

Модифицированная процедура осуществляет поиск решеток уточнения и позволяет 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.

Из формул (3), (4) следует, что информационные расстояния вычисляются для реконструкций полной системы. Чтобы перейти от решетки уточнения (набора подсистем, составляющих структурированную систему) к реконструкции полной системы, необходимо решить задачу идентификации – задачу нахождения реконструктивной гипотезы на основе имеющихся подсистем. В рамках повышения эффективности процесса поиска несмещенной реконструкции при идентификации систем была модифицирована итеративная процедура соединения, введено: ограничение на число выполняемых соединений ψ , определение значения допустимой погрешности Δ_S .

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;

б) конец.

Значение Δ_S задается исследователем, что позволяет расширить поиск оптимальной реконструкции, а введенное ограничение ψ на число соединений позволяет определить этап завершения выполнения процедуры и сделать вывод о возможности реконструкции.

Третья глава посвящена программной реализации разработанных численных алгоритмов и метода в рамках программного комплекса, его экспериментальному исследованию. Глава содержит описание алгоритмов работы программных модулей (рисунки 3-5), краткое описание разработанных специфических программных классов. Представлена апробация численного алгоритма генерации порождающих систем и поиска оптимальных из них, которая показала его эффективность и точность. Обоснованность модификации численного метода структурированных систем и достоверность полученных с помощью модифицированного метода результатов подтверждена сопоставлением качества полученного им решения и количества реконструктивных гипотез, сформированных в процессе решения, введенные модификации позволили сократить число реконструктивных гипотез по сравнению с оригинальным методом без потери точности вычислительного результата, при полном сохранении значений информационных расстояний и значимости результирующих гипотез.

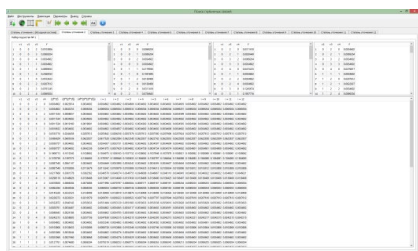


Рисунок 3 – Модуль поиска глубинных связей с результатами расчетов

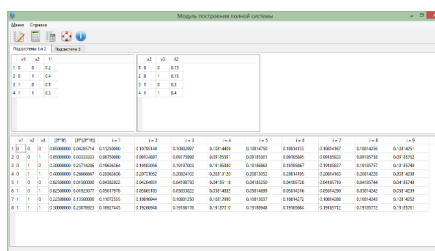


Рисунок 4 – Модуль синтеза систем с результатами расчетов

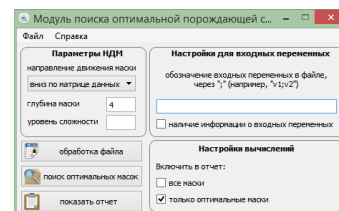


Рисунок 5 – Модуль поиска оптимальных порождающих систем

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Осуществлено математическое моделирование порождающих систем, включающее анализ функции поведения и требований, предъявляемых к нечеткости оптимальных систем. Построена математическая модель уровня структурированных систем и ее расширенная версия, учитывающая наличие целевых переменных и соответствие ограничениям, предъявляемым к информационному расстоянию системы.

2. Предложена математическая постановка задачи поиска оптимальной порождающей системы и алгоритм ее решения, на основе разработанной математической модели. Разработан 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.

3. Разработан модифицированный численный метод структурированных систем, позволяющий: определить значимые элементы, установить глубинные связи между элементами систем, проводить декомпозицию и синтез систем.

4. Разработаны программные алгоритмы, учитывающие системологическую специфику реализации созданных моделей, алгоритмов и методов.

5. Разработан комплекс программ поддержки принятия решений, осуществляющий автоматизацию решения системных задач.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

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

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

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

4. 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.

5. 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.

6. 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. DOI: 10.31429/vestnik-15-2-12-18.

Публикации в других изданиях:

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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» 1-2 декабря 2014 г., – North Charleston, США, 2014. –Т.1. – С. 99–101.

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

12. 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» 3-4 августа 2015 г. – North Charleston, США, 2015. – С. 200–202.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. Синельникова, Т. И. Моделирование биологических систем на основе гемограмм 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.

21. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

22. 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.

23. 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.

24. 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.