На правах рукописи

Сергеев Владимир Александрович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАБОРОВ ДИСКРЕТНЫХ ДАННЫХ

Специальность 2.3.4 – Управление в организационных системах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН).

Научный руководитель:	**Коргин Николай Андреевич**, доктор технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	**Горбанева Ольга Ивановна**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», доцент кафедры прикладной математики и программирования **Серебрякова Елена Анатольевна**, кандидат экономических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», доцент кафедры управления
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита состоится 16 мая 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.107.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН по адресу: Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на сайте www.ipu.ru.

Автореферат разослан ________________________________2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.107.02
кандидат физико-математических наук Тремба Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. *Механизм комплексного оценивания* (МКО) – это инструмент для оценки и ранжирования в организационных и производственных системах. МКО позволяет получать комплексную оценку оцениваемого сложного объекта путем свертки рассматриваемых показателей, характеризующих объект. Основные компоненты механизма комплексного оценивания – полное бинарное дерево на l именованных листьях и матрицы логической свертки. Механизмы комплексного оценивания были введены в Советском Союзе в начале 80-х годов прошлого века в как средство оценки в контурах управления и контроля в организационных и производственных системах. Например, система АККОРД для электронной промышленности, в разработке которой принимали участие В.А. Трапезников, Н.И. Гореликов, В.Н. Бурков, В.А. Зимоха, А.В. Толстых, А.М. Черкашин, В.В. Цыганов. В настоящее время МКО используются в целом спектре прикладных задач. Например, при оценке уровня инновационного развития отрасли, оценке проектов НИОКР, оценке программ регионального развития, в системах управления развитием организации, при оценке проектов в сфере малого и среднего предпринимательства, при оценке экологических рисков, оценке эффективности управления коммерческой и жилой недвижимостью, в механизмах поддержки принятия решений и других задачах организационной деятельности.

Механизмы комплексного оценивания могут быть отнесены к классу так называемых методов вербального анализа решений (ВАР) для неструктурированных проблем и предназначены для порядкового ранжирования или классификации с заранее определенным числом классов конечного набора многокритериальных альтернатив. Помимо выполнения самостоятельной роли агрегации оценки сложного объекта в сфере механизмов поддержки принятия решений, МКО может использоваться в цикле управления как элемент блока контроля. Также представляется актуальной задача управления входными параметрами для достижения необходимого значения комплексной оценки.

Основной подход к синтезу параметров МКО предполагает итеративное взаимодействие с лицами, принимающими решения. Это направление широко разработано В.Н. Бурковым, Р.Н. Блачевым, В.А. Глотовым, В.В. Павельевым и другими. Однако в настоящее время существует запрос на разработку обучающих процедур для МКО, которые довольно обычны для алгоритмов синтеза в области искусственного интеллекта. Подобная задача исследовалась лишь для отдельных частных случаев А.О. Алексеевым, В.Н. Бурковым, Е.А. Казаковой В этой работе приводится несколько подходов к синтезу структур и матриц МКО. Характерной особенностью предлагаемых методов синтеза матриц является использование обучающего набора примеров, в том числе и с применением довольно популярного в настоящее время подхода из области искусственного интеллекта – представление категориальных оценок на основе унитарного кодирования. Также рассматривается актуальный вопрос выбора структуры полного бинарного дерева МКО.

Объект исследования. Механизмы комплексного оценивания.

Предмет исследования. Методы анализа и синтеза механизмов комплексного оценивания.

Целью работы является разработка методов анализа и синтеза механизмов комплексного оценивания на основе наборов дискретных данных.

Для достижения цели требуется решить следующие **задачи.**

1. Провести анализ существующих методов анализа и синтеза механизмов комплексного оценивания.
2. Разработать методы анализа и синтеза множества рассматриваемых структур полных бинарных деревьев.
3. Разработать метод синтеза матриц механизма комплексного оценивания заданной структуры на основе наборов дискретных данных.
4. Разработать общий алгоритм и реализующее его программное обеспечение для анализа и синтеза механизмов комплексного оценивания на основе наборов дискретных данных.

Научная новизна.

1. Впервые предложены методы записи, синтеза и сокращения множества рассматриваемых структур полных бинарных деревьев, позволяющие выбирать перспективные структуры для задачи синтеза матриц.
2. Впервые предложены методы синтеза матриц МКО заданной размерности для случаев полного и неполного наборов дискретных данных.
3. Предложен общий алгоритм анализа и синтеза МКО. Алгоритм разработан с использованием предложенных алгоритмов анализа и синтеза и впервые реализован в виде комплекса программ.

Достоверность полученных научных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических моделей, сравнением аналитических результатов с результатами работы программного кода алгоритмов. Разработанные методы и алгоритмы, содержащиеся в методике анализа и синтеза механизма комплексного оценивания, успешно прошли апробацию, что подтверждается в том числе актами о внедрении.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы. Теоретическая значимость заключается в развитии методов анализа и синтеза МКО. Метод анализа групп эквивалентности позволил создать эффективный инструмент синтеза МКО на полных наборах данных. А в случае с неполными наборами данных перейти от рассмотрения всего множества полных двоичных деревьев на именованных листьях, число деревьев в котором растет как двойной факториал от числа входных параметров, к рассмотрению таблицы ветвей реализующихся ветвей. Предложены методы синтеза матриц МКО на основе таблицы обучающих примеров. Исследованы вопросы реализуемости булевых функций трех и четырех переменных на основе МКО.

Практическая значимость работы заключается в создании алгоритмов и программного обеспечения, которые позволяют синтезировать МКО на основе набора дискретных данных. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют решать задачи синтеза матриц МКО, используя обучение на основе таблицы примеров, без необходимости привлечения экспертов для выбора структуры МКО, формирования матриц МКО и согласования результатов работы экспертов. Разработанные инструменты анализа позволяют получать древовидное представление набора данных, а также производить: структурный анализ вклада отдельных переменных в итоговое значение, анализ влияния отдельных переменных и групп переменных на итоговое значение агрегированного показателя, анализ монотонности обучающего набора дискретных данных, выделение целевых примеров для дальнейшего синтеза модели.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методы записи, синтеза и сокращения множества рассматриваемых структур полных бинарных деревьев: метод поиска числа групп эквивалентности, метод таблицы ветвей, методы генерации структур. Предложенные методы позволяют сформировать и выбрать структуры, перспективные для синтеза МКО при разработке математических моделей оценки организационных систем.

2. Методы синтеза матриц МКО для наборов дискретных данных: методы синтеза матриц рассматриваемой структуры МКО для случаев полного и неполного наборов данных, декомпозиционный метод синтеза для неполного набора данных. Предложенные методы используются для синтеза моделей оценки организационных систем, которые могут использоваться для расчета критериев эффективности, качества и надежности организационных систем.

3. Общий алгоритм и реализующее его программное обеспечение, позволяющее решать прикладные задачи анализа и синтеза МКО в организационных системах. Разработанное программное обеспечение может быть использовано в составе систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах.

Соответствие пунктам паспорта специальности 2.3.4. Управление в организационных системах.

1. Положение 1 соответствует **п. 5** «Разработка методов получения данных и идентификации моделей прогнозирования и управления организационными системами на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации».

2. Положение 2 соответствует **п. 2** «Разработка математических моделей и критериев эффективности, качества и надежности организационных систем».

3. Положение 3 соответствует **п. 4** «Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах».

Методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертации, использовались методы комбинаторики, теории активных систем, дискретной оптимизации, машинного обучения. При разработке программного обеспечения использовались методы объектно-ориентированного программирования.

Апробация результатов. Основные научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях: IV Российский экономический конгресс (РЭК-2020 г., Москва), Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems (APMS 2021 г., Nantes, France, online), 20th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (2021 г., ИПУ РАН, г. Москва), XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (2021 г., ИПУ РАН, г. Москва), XXII Апрельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества (2021 г., ВШЭ, г. Москва, online), XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (2022 г., ЮУрГУ, г. Челябинск), Математическая теория оптимизации и исследование операций (2022 г., Петрозаводск), Научно-практическая конференция «Технологическое развитие авиастроения: глобальные тенденции и национальные интересы России» 2022; на общемосковских семинарах: «Теория управления организационными системами» и «Математические методы анализа решений в экономике, бизнесе и политике»; на семинаре Пермского научно-образовательного центра проблем управления, а также на научных семинарах ИПУ РАН.

Связь с планами научных исследований.

Работа выполнялась при поддержке гранта Российского научного фонда 17-78-20047.

Внедрение результатов работы.

1. Методы синтеза механизмов комплексного оценивания внедрены в процедуру оценки дизайн-решений в рамках проекта «Арктический дизайн: методы технической эстетики в освоении и развитии территорий Российского Севера», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

2. Методы синтеза механизмов комплексного оценивания внедрены в процедуру синтеза МКО для контура системы управления робототехническими комплексами (экспериментального стенда) в рамках реализации

научно-исследовательской работы «ВИАС-Модель-2022» ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского».

3. Методы синтеза МКО внедрены для синтеза системы комплексного оценивания платежеспособности российских строительных компаний в ООО «Пермский центр поддержки принятия решений».

Личный вклад. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Комплекс программ разработан автором.

Публикации. Основные положения и выводы диссертационного исследования нашли отражение в 9 научных работах. По результатам опубликованы две статьи в рецензируемых научных изданиях по специальности 2.3.4, относящиеся к категории К1 Перечня ВАК [1, 2], одна работа в журнале, индексированном в международных базах данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендацией ВАК [3], шесть статей опубликованы в прочих изданиях [4, 5, 6, 7, 8, 9], а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [10].

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования, формулируется научная проблема, заключающаяся в разработке методов и программного инструментария анализа и синтеза МКО на основе входного набора дискретных данных. Формулируются цель и задачи. Указываются сведения о научной новизне, достоверности, апробации, внедрении, значимости результатов, положениях, выносимых на защиту.

В **главе 1**, для обозначения связей МКО с другими методами делается обзор широко известных методов многокритериального оценивания. Отдельно рассматриваются вербальные методы, к которым принято относить механизмы комплексного оценивания. Приводится обзор работ значимых для развития области методов комплексного оценивания. Даются ссылки на работы, посвященные синтезу механизмов на основе данных, заданных в табличном виде. Отмечаются работы В.Н. Буркова и А.О. Алексеева по синтезу МКО, а также, работы группы авторов T. Luba, H. Selvaraj, B. Zupan, M. Perkowski и других, по декомпозиции дискретных функций. С опорой на работы В.Н. Буркова, А.В. Щепкина, Д.А. Новикова и других, демонстрируется базовый подход к проблеме синтеза МКО на основе экспертных оценок. Описываются основные трудности, связанные с экспертным подходом.

Далее вводятся основные понятия и дается определение механизма комплексного оценивания. Пусть задан конечный набор индикаторов (показателей) $L \subset \mathbb{N}$, $|L| = l$, на основе их значений должна быть произведена порядковая оценка некоторого объекта или ранжирование нескольких объектов. Отдельный индикатор отражает определенное свойство рассматриваемого сложного объекта. Значения индикаторов задаются в дискретной шкале, например, 1 балл – плохо, 2 балла – удовлетворительно, 3 – хорошо. Для задачи синтеза МКО будем считать, что для каждого индикатора $i \in L$ задан конечный набор $K_i \subset \mathbb{N}$ его возможных значений, $k_i \in K_i$ – оценка, дискретная величина. Вектор $k = (k_1, \ldots, k_l)^T$ – совокупность оценок на основе оценок отдельных индикаторов. Считаем, что совокупность всех возможных комбинаций оценок, описывает любое возможное состояние оцениваемого объекта. Также есть конечный набор $K_L \subset \mathbb{N}$ возможных интегральных значений (рангов или классов) $k_L \in K_L$ для любого k. Дается определение МКО.

Определение 1. Механизм комплексного оценивания – это отображение $w(\cdot): K \to K_L$, для которого индикаторы L являются именованными листьями полного бинарного дерева – ориентированного графа $G = (V, E)$:

1. $V = L \cup \hat{L}$, $\hat{L} = \{l+1, \ldots, 2l-1\}$.
2. $E = \{e_{ij}\} \subseteq V \times V$,

   а. $\forall i \in V \setminus \{2l-1\}\ \ \exists!\, j \in \hat{L} \setminus \{i\}:\ e_{ij} = 1,\ \forall t \in V \setminus j\ \ e_{it} = 0$;

   б. $\forall j \in L\ \ \forall i \in V\ \ e_{ij} = 0$;

   в. $\forall j \in \hat{L}\ \ \ \exists! \{r, c\} \in V \setminus \{j\} \times V \setminus \{j\} : e_{rj} = 1, e_{cj} = 1$;

и $\forall j \in \hat{L}$ заданы:

1) конечный набор $K_j \subset \mathbb{N}$ с возможными значениями $k_j \in K_j$, $K_{2l-1} = K_L$;

2) матрица свертки $M_j = [m_{jgp} \in K_j]_{g \in \{0, \ldots, |K_r|-1\},\, p \in \{0, \ldots, |K_c|-1\}}$, и $\{r, c\} \in V \setminus \{j\} \times V \setminus \{j\} : e_{lj} = 1, e_{rj} = 1$ определены. □

Здесь $K = \prod_{i \in L} K_i$ обозначает декартово произведение $K_1 \times K_2 \times \ldots \times K_l$, V – множество всех вершин G, $\hat{L}$ – множество внутренних вершин G, E – множество ребер G, заданное матрицей смежности, g – строка матрицы свертки, p – столбец матрицы свертки. Для $L \subset \mathbb{N}$ обозначим $\Gamma_2(L)$ – набор всех бинарных деревьев с листьями из L, $IRM_{L,2}$ – набор всех МКО для любого конкретного бинарного дерева $G \in \Gamma_2(L)$, $IRM_{L,G} \subseteq IRM_{L,2}$ – набор всех МКО с таким деревом.

Затем, через концепцию реализуемости заданного обучающего набора посредством некоторой МКО, формализуется задача обучения. Обозначим через $q = (k, k_L)$ отдельный обучающий пример, через $Q \subset K \otimes K_L$ обучающий набор (из предоставленных примеров), состоящий из значений оценок по каждому из индикаторов и интегральной оценки для данной совокупности значений индикаторов. В рамках данной работы рассматриваются МКО с единой шкалой, т.е. $\forall i \in L\ K_i = K_L$.

Определение 2. $w(\cdot) \in IRM_{L,2}$ реализует Q тогда и только тогда, когда $\forall q \in$ Q имеет место равенство $w(k) = k_L$.□

Обозначим через $IRM_{L,2}(Q)$ множество всех МКО, которые реализуют Q, через $IRM_{L,G}(Q)$ множество всех МКО, которые реализуют Q и построены на основе двоичного дерева $G \in \Gamma_2(L)$. Тогда, если $IRM_{L,2}(Q) \neq \emptyset$, то Q *реализуема на основе* МКО; если $IRM_{L,G}(Q) \neq \emptyset$, тогда Q является *реализуемой на основе* МКО со структурой G. Таким образом, *задача синтеза* МКО состоит в поиске матриц M_j, $j \in \{l+1,...,2l-1\}$, либо на наборе деревьев $\Gamma_2(L)$: $w(\cdot) \in IRM_{L,2}(Q)$, либо $w(\cdot) \in IRM_{L,G}(Q)$ на некотором определенном дереве $G \in \Gamma_2(L)$.

Определение 2 также может быть сужено до одного конкретного обучающего примера: $w(\cdot) \in IRM_{L,2}$ реализует некоторый пример $q \in Q$ тогда и только тогда, когда $w(k) = k_L$; так же определяются $IRM_{L,2}(q)$ и $IRM_{L,G}(q)$.

Если $IRM_{L,2}(Q) = \emptyset$ или $IRM_{L,G}(Q) = \emptyset$, то возможно поставить задачу *аппроксимации*. Для конкретного $w(\cdot) \in IRM_{L,2}$ обозначим $Q_w = \{q \subseteq Q : w(k) = k_L \}$. Для любого произвольного $w(\cdot) \in IRM_{L,2}$ обозначим через $U_Q(w) = |Q_w| / |Q|$ качество аппроксимации с максимумом в 1, если $w(\cdot) \in IRM_{L,2}(Q)$. Тогда задача аппроксимации заключается в поиске $w^*(\cdot) \in Arg \max_{w \in IRM_{L,2}} U_Q(w)$. Для отдельного бинарного дерева $G \in \Gamma_2(L)$ может быть сформулирована аналогичная задача – найти $w^*(\cdot) \in Arg \max_{w \in IRM_{L,G}} U_Q(w)$.

МКО построенный таким образом – экономный аппроксиматор. Если размер шкалы равен κ, а количество индикаторов равно l, то гиперкуб, содержащий все возможные значения полного набора примеров, содержит κ^l ячеек. Если мы пытаемся аппроксимировать этот набор на основе МКО и полных двоичных деревьев с именованными листьями, в единой шкале, то нам нужно найти только $(l-1)\kappa^2$ переменных.

Вторая глава посвящена анализу и синтезу структур МКО. В разделе 2.2 вводится инструмент унитарного кодирования. Для некоторого конечного набора $K \subset \mathbb{N}$ вводится его *нормализованное* представление $\bar{K} = \{0,...,|K|-1\}$. Тогда $\forall x \in \bar{K}$ введем унитарное представление $\tilde{x} = (\underbrace{0,...,0}_{x},1,\underbrace{0,...,0}_{|K|-1-x})^{\mathrm{T}}$. Например, ноль и единица в унитарном виде записываются как: $\tilde{0} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $\tilde{1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Операция унитарного кодирования также применяется и к матрицам свертки. Дана некоторая матрица свертки $M = [m_{rc} \in K]_{\{r,c\} \in \bar{K}^2}$, обозначим $\tilde{M} = [\tilde{m}_{rc}]_{\{r,c\} \in \bar{K}^2}$, где $\tilde{m}_{rc}$ – унитарное представление m_{rc} в наборе K. Таким образом, унитарная матрица – это матрица, в каждой ячейке которой стоит унитарный вектор. Тогда для $\tilde{l}_2^{\mathrm{T}} M \tilde{l}_1 = x$, операция $\tilde{l}_2^{\mathrm{T}} \tilde{M} \tilde{l}_1$ даст унитарный результат $\tilde{x}$. Мы используем упрощенное квадратичное представление записи $\tilde{l}_2^{\mathrm{T}} \tilde{M} \tilde{l}_1$ в виде $\tilde{M} \tilde{l}_1 \tilde{l}_2$. Инструмент унитарного кодирования как показано в третьей главе позволяет сформулировать проблему синтеза матриц МКО как оптимизационную проблему.

Предлагаются правила для кодирования МКО, что позволяет работать со множеством структур МКО как с набором «слов» или мл-записей. Принимая во внимание тот факт, что любое полное двоичное дерево с l листьями должно иметь $l-1$ внутренних узлов, включая корень, любой МКО может быть закодирован в форме «слова» с $2l-1$ буквами в упрощенном квадратичном представлении; $l-1$ буквами должны обозначаться матрицы свертки (внутренние узлы) и l – листья. Так, например структура, изображенная на рисунке 1, опуская тильды, записывается как: $M_1 l_1 M_2 l_2 l_3$.

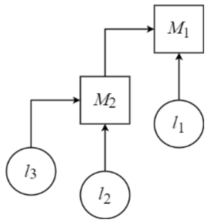

Рисунок 1 – Структура $M_1 l_1 M_2 l_2 l_3$.

Применение унитарного кода позволяет реализовать подход, в рамках которого любой МКО может быть рассмотрен как последовательность матричных операций с унитарно закодированными значениями листьев в соответствии со «словом», которое описывает соответствующий МКО. Результатом такой последовательности операций является унитарно закодированный результат МКО $\tilde{w}$.

В разделе 2.3 вводится метод анализа групп эквивалентности (АГЭ). Данный метод является развитием метода используемого M. Perkowski, B. Zupan и др. исследователями для задачи декомпозиции дискретной функции. Впервые, похожий подход к анализу дискретной функции встречается, для булевых функций, у R. Ashenhert. В данной работе предложены эвристический и точный метод вычисления групп эквивалентности. Приводятся *утверждение 1* о группах эквивалентности и *утверждение 2* о реализуемости МКО в единой шкале для полного обучающего набора. На основе сформулированного утверждения 2 демонстрируется возможность отбора потенциально реализуемых структур МКО. В таблице 1 в качестве сквозного примера приведен набор данных предложенный С.И. Николенко в книге «Самообучающиеся системы».

Таблица 1 – Обучающий набор на четырех индикаторах.

q	l_1	l_2	l_3	l_4	f
1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	1
3	1	1	0	0	0
4	0	0	1	0	1
5	1	1	1	0	1
6	0	1	0	1	1
7	1	0	1	1	0
8	1	1	1	1	0

В разделе 2.5 предлагается форма записи структур в компактном виде, именуемая «таблица ветвей». В таблице 2 приведены подгруппы листьев полученные, в результате анализа групп эквивалентности, для набора на четырех параметрах, заданного в таблице 1. $L_i \subseteq L$ – набор листьев (индикаторов) поддерева с корнем в i, тогда λ_i – разбиение кортежа индикаторов поддерева с корнем в i.

Таблица 2 – Таблица ветвей, для рассматриваемого набора данных, после отсева разбиений, не укладывающихся в шкалу {0, 1}.

№	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
L_i	1 2	2 3	3 4	1 2 4	2 3 4	1 2 3 4
λ_i	1 2	2 3	3 4	4, 1 2	4, 2 3	3, 1 2 4
					2, 3 4	1, 2 3 4
						1 2, 3 4

На основе представленных в таблице 2 ветвей можно синтезировать структуры, для рассмотрения в рамках механизмов синтеза матриц из третьей главы данной работы. Структуры, синтезируемые для данных представленных в таблице 1: $M_1 l_1 M_2 l_2 M_3 l_3 l_4$, $M_1 l_1 M_2 l_4 M_3 l_2 l_3$, $M_1 l_3 M_2 l_4 M_3 l_1 l_2$, $M_1 l_1 l_2 M_2 l_3 l_4$.

Предлагаемый подход позволяет, во-первых, отсеять структуры $G \in \Gamma_2(L)$, для которых в рамках заданной шкалы, невозможен синтез МКО на основе рассматриваемого неполного обучающего набора. Т.е. позволяет убрать из рассмотрения структуры, на которых описываемая обучающим набором дискретная функция не представима в виде полного бинарного дерева в рамках заданной шкалы κ. Во-вторых, показано, что для полного набора входных данных можно использовать алгоритм анализа групп эквивалентности непосредственно для синтеза МКО.

В разделе 2.6 приводятся методы генерации полных бинарных деревьев, предложенные в данной работе.

В главе 3 исследуется проблемы анализа и синтеза матриц МКО. В разделе 3.1 предложен алгоритм синтеза матриц МКО для заданной структуры полного двоичного дерева на полном наборе данных.

В разделе 3.2 веденный ранее инструмент унитарного кодирования применяется для синтеза полного набора матриц для заданной структуры МКО. Унитарное кодирование теперь применяется также и к обучающим примерам. Для некоторого обучающего примера $q = (k, k_L)$ унитарная версия обозначается через $\tilde{q} = (\tilde{k}, \tilde{k}_L)$, где $\tilde{k}_L$ – унитарное представление k_L и $\tilde{k}$ – кортеж k в унитарном представлении.

Очевидно, что если $w(\cdot) \in IRM_{L,2}$ реализует некоторый пример $q \in Q$, то $\tilde{w}(\tilde{k}) = \tilde{k}_L$. Из этого следует, что для того, чтобы найти МКО, который реализует некоторый обучающий пример, необходимо решить систему уравнений, полученных на основе унитарного представления этого МКО с дополнительными ограничениями, вытекающими из унитарного представления. Рассмотрим задачу синтеза МКО на основе одного обучающего примера $q = ((0, 0, 0), 0)$ с $|L| = 3$, $|K_L| = 2$. В унитарном представлении $\tilde{q} = ((\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}), \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}))$.

Если МКО имеет структуру $\tilde{w}(\tilde{k}) = \tilde{M}_1\tilde{l}_1\tilde{M}_2\tilde{l}_2\tilde{l}_3$, то необходимо решить систему уравнений

$$(1)\quad \left(\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} m2_{00}^{0} \\ m2_{00}^{1} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} m2_{01}^{0} \\ m2_{01}^{1} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} m2_{10}^{0} \\ m2_{10}^{1} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} m2_{11}^{0} \\ m2_{11}^{1} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \right)^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} m1_{00}^{0} \\ m1_{00}^{1} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} m1_{01}^{0} \\ m1_{01}^{1} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} m1_{10}^{0} \\ m1_{10}^{1} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} m1_{11}^{0} \\ m1_{11}^{1} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$$

с унитарными условиями: $\forall\{i, j\} \in \{0,1\}^2 \quad m1_{ij}^{0} + m1_{ij}^{1} = 1, \quad m2_{ij}^{0} + m2_{ij}^{1} = 1$, $\forall t \in \{0,1\} \quad m1_{ij}^{t} \in \{0,1\}$, $m2_{ij}^{t} \in \{0,1\}$.

Система уравнений (1) может быть последовательно упрощена до:

$$m2_{00}^{0} m1_{00}^{0} + m2_{00}^{1} m1_{10}^{0} = 1,$$

$$m2_{00}^{0} m1_{00}^{1} + m2_{00}^{1} m1_{10}^{1} = 0.$$

Из полученной системы уравнений видно, что решением являются любые матрицы M_1 и M_2 такие, что $\tilde{m}1_{00} = \tilde{m}2_{00} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. Это означает, что будет достаточно определить $m1_{00} = m2_{00} = 0$ для реализации $q = ((0, 0, 0), 0)$ в МКО с унитарным представлением $\tilde{w}(\tilde{k}) = \tilde{M}_1 \tilde{l}_1 \tilde{M}_2 \tilde{l}_2 \tilde{l}_3$.

Далее приводятся утверждения и следствия необходимые для постановки задачи оптимизации. Нумерация утверждений и следствий соответствует нумерации в диссертации.

Утверждение 3. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$, МКО с единой шкалой $w(\cdot) \in IRM_{L,2}(Q)$ и любого возможного q в единой шкале: $P(w, q)$ – однородный полиномом степени $l-1$, который может быть представлен как сумма κ^{l-2} уникальных компонент:

$$P(w,q) = \sum_{j=1}^{\kappa^{l-2}} p_j\,, \qquad \forall j \in \{1,\ldots,\kappa^{l-2}\} \qquad p_j = \prod_{i=1}^{l-1} m_i\,, \qquad \forall i \in \{1,\ldots,l-1\}\,,$$

m_i – одна компонента кортежа в некоторой ячейке унитарно закодированной матрицы $\tilde{M}_i$; $\{\tilde{M}_i\}_{i\in\{1,\ldots,l-1\}}$ – набор всех унитарно закодированных матриц свертки МКО w; $\kappa = |K|$ – шкала значений индикатора;

$P(w,q) \in \{0,1\}$;

$P(w,q) = \tilde{w}(\tilde{k})^{\mathrm{T}} \tilde{k}_L$;

IRM w реализует $q \Leftrightarrow P(w, q) = 1$. □

Утверждение 4. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$ и любого возможного $Q \subset K^{l+1}$ с единой шкалой решение задачи аппроксимации МКО с единой шкалой состоит в решении задачи максимизации:

(4) $\max\limits_{w\in \mathrm{IPM}_{L,G}} \sum\limits_{q\in Q} P(w,q)$

при ограничениях:

(5) $\forall \{\tilde{M}_i\}_{i\in\{1,\ldots,l-1\}}, \forall \tilde{m} \in \tilde{M}_i\ \tilde{m} \in [0;1]^l,\ |m| = 1$.□

Следствие 2. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$ и любой $Q \subset K^{l+1}$ с единой шкалой может быть реализован с помощью МКО с единой шкалой тогда и только тогда, когда существует $w \in IRM_{L,2}(Q)$, такое что $\sum\limits_{q\in Q} P(w,q) = |Q|$.□

На основе доказанных утверждений и следствий предложен метод синтеза полного набора матриц МКО для заданной структуры.

Алгоритм синтеза всех матриц заданной структуры.

Входные данные: предварительно подготовленная таблица дискретных данных на l параметрах и структура или список структур, шкала значений функции (опционально).

Выходные данные: значения для l -1 матриц для каждой из рассматриваемых структур.

1. **Пока** есть структуры в списке структур:
   a. В соответствии с утверждением 3, на основе таблицы данных и текущей структуры, генерируются однородные полиномы, для каждого из примеров входных данных.
   b. В соответствии с утверждением 4, производится формирование единого оптимизационного функционала (ОФ) на основе полученных полиномов.
   c. На основе составленного ОФ и ограничений унитарности формулируется задача для решателя.
2. Вывод результатов.

В разделе 3.3 приводится метод синтеза МКО с применением разделительной декомпозиции. Метод синтеза МКО на неполных данных с использованием унитарного кодирования рассмотренный в разделе 3.2, сопряжен с вычислительной сложностью решения оптимизационной задачи, в случае большой шкалы входных данных или большого числа параметров входных данных. Степень оптимизационного полинома растет линейно в зависимости от количества входных параметров, а число общих ограничений оптимизационной задачи растет экспоненциально: $Cn = \kappa^{l-2} ex\_num$, где Cn - число общих ограничений, $\kappa = |K|$ - шкала значений индикатора для параметров в единой шкале, *ex_num* – количество примеров в наборе Q, l - число параметров. Поэтому был предложен метод решения задачи синтеза с помощью разделительной декомпозиции функции $f(X) = \Sigma(X_1, a(X_2))$, где Σ, a – некоторые функции, а $X_1 \cap X_2 = \emptyset$.

Для формулирования утверждений приведем обозначения, введенные в разделе 2.3. Для любого произвольного $G \in \Gamma_2(L)$, обозначаем его структуру декомпозиции показателей как $\Lambda(G) = \{L_i\}_{i\in\{1,..,l-1\}}$. Пусть дан некоторый полный набор Q и $G \in \Gamma_2(L)$. Тогда для любого $L_i \in \Lambda(G)$ такого что $L_i \geq 2$ и его подгруппы $\{L_{ir}; L_{ic}\} \subset \Lambda(G)$: $L_{ir} \cup L_{ic} = L_i$. Для любых допустимых значений индикаторов из $L_{ir} - k_{(L_{ir})}$, $\tilde{k}_{(L_{ir})}$ и из $L_{ic} - k_{(L_{ic})}$, $\tilde{k}_{(L_{ic})}$. Каждому дереву из $G \in \Gamma_2(L)$, в силу структуры полного бинарного дерева, можем сопоставить L_i, тогда $\lambda_i = \left(k_{(L_{ir})}, k_{(L_{ic})}\right)$ – разбиение кортежа индикаторов в i-м узле дерева G. В каждом из рассматриваемых узлов дерева имеем некоторую дискретную функцию $\varphi_i(k_{(L_i)})$. Компоненты $\varphi_i(k_{(L_i)})$ именуем в соответствии с λ_i как $\varphi_r(k_{(L_{ir})})$ и $\varphi_c(k_{(L_{ic})})$. Обозначим через $P(\lambda_i, q)$ функцию, которая находится в левой части уравнения с правой частью, равной 1.

Вследствие унитарного подхода есть только одна такая функция для любого q. Через Q_i обозначен набор данных полученный из исходного Q, путем выделения только тех столбцов, на которых определена $\varphi_i(k_{(L_i)})$.

Утверждение 5. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$, и любого возможного q в единой шкале: $P(\lambda_i, q)$ – однородный полиномом степени меньше или равной 3, который может быть представлен как сумма k^{φ_num} уникальных компонент:

$$P(\lambda_i, q) = \sum_{j=1}^{\kappa^{\varphi\_num}} p_j\ , \qquad \forall j \in \{1,\dots,\kappa^{\varphi\_num}\}, \qquad p_j = m_j \prod_{d=1}^{\varphi\_num} \varphi_d\ ,$$

$\forall d \in \{1,\dots,\varphi\_num\}$, где φ_d – обозначение компонент функций, на основе которых декомпозируется φ_i, m_j – одна компонента кортежа в некоторой ячейке унитарно закодированной матрицы $\tilde{M}_i$, q – пример из Q_i, φ_num = 1 при подсоединении к матрице ветви и листа, φ_num = 2 при подсоединении к матрице пары ветвей;

$P(\lambda_i, q) \in \{0,1\}$;

$\varphi_i(k_{(L_i)})$ реализует $q \Leftrightarrow P(\lambda_i, q) = 1$. □

Следствие 3. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$ и любого возможного $Q_i \subset K^{l+1}$ с единой шкалой $\varphi_i(k_{(L_i)})$ реализует Q_i, тогда и только тогда когда $\sum_{q \in Q_i} P(\lambda_i, q) = |Q_i|$ для любого возможного q в единой шкале, с учетом ограничений согласования значений $\varphi_r(k_{(L_{ir})})$ *и* $\varphi_c(k_{(L_{ic})})$ для всех примеров из Q_i. □

Если к рассматриваемой матрице присоединяются две ветви, то $\varphi\_num = 2$ и следует рассмотреть согласованность функций $\varphi_r(k_{(L_{ir})})$ и $\varphi_c(k_{(L_{ic})})$ для каждой из ветвей.

Утверждение 6. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$, $IRM_{G,2}(q)$, представленный как декомпозиция некоторой заданной в табличном виде функции f, реализует $Q \subset K^{l+1}$, если $\varphi_i(k_{(L_i)})$ для некоторой последовательности разбиений $\Lambda(G)$, соответствующей дереву G, реализует Q_i для $i \in \{1,\dots,l\text{-}1\}$.□

Следствие 4. Если $\sum_{q \in Q_i} P(\lambda_i, q) < |Q_i|$, $\forall i \in \{1,\dots,l\text{-}1\}$, то $IRM_{G,2}(Q) = \varnothing$.

□

Таким образом, если для матрицы верхнего уровня, удается найти решение оптимизационной задачи $\underset{m_{rc},\varphi_r,\varphi_c}{Arg\max}\sum_{q\in Q_1}P(\lambda_1,q)$, такое что $\sum_{q\in Q_1}P(\lambda_1,q)=\left|Q_1\right|$, можно продолжить декомпозицию на следующий узел структуры, в качестве функции теперь используя найденные значения компонент $\varphi_1(k_{(L_1)})$. При этом $\varphi_1(k_{(L_1)})$ и найденные значения M_1 можно использовать для декомпозиции на поддеревьях $\{L_{1r}; L_{1c}\}\subset\Lambda(G)$ на значениях индикаторов $k_{(L_{1r})}$, $k_{(L_{1c})}$ соответственно. Применяя данный подход, последовательно для $\Lambda(G)$ можно найти $\varphi_i(k_{(L_i)})$ и M_i, $\forall\ i\in\{1,\ldots,l\text{-}1\}$.

Рассматривается пример синтеза МКО, на основе предложенного метода. Ниже представлен шаг алгоритма для матрицы M_1. Используется набор данных из таблицы 1. На первом шаге, рассматривается реализуемость функции $f=\varphi_1(\tilde{l}_1,\ \varphi_2(\tilde{l}_2,\ \tilde{l}_3,\ \tilde{l}_4))$. Последовательность рассматриваемых разбиений может быть сформирована на основе таблицы ветвей. В данном примере используется разбиение $\lambda_1=\left(k_{(1)},\ k_{(2,3,4)}\right)$. В случае если $\varphi_1(k_{(L_1)})$ доступна в заданной шкале k_L, то происходит переход к поиску реализации M_2 на основе вектора дискретной функции $\varphi_2(k_{(L_2)})$. Составим уравнения для первого примера первой ступени

$$(2)\quad \left(\begin{pmatrix}\varphi^0_{2\_000}\\ \varphi^1_{2\_000}\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\begin{pmatrix}m1^0_{00}\\ m1^1_{00}\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}m1^0_{01}\\ m1^1_{01}\end{pmatrix}\\ \begin{pmatrix}m1^0_{10}\\ m1^1_{10}\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}m1^0_{11}\\ m1^1_{11}\end{pmatrix}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}\right)=\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}$$

с унитарными условиями $\forall\{i,\ j\}\in\{0,1\}^2$, $m1^0_{ij}+m1^1_{ij}=1,\ m1^t_{ij}\in\{0,\ 1\}$, $\varphi^0_{2\_000}+\varphi^1_{2\_000}=1$, $\varphi^t_{2\_000}\in\{0,1\}$, $\forall t\in\{0,1\}$. Имеем

$$\varphi^0_{2\_000}m1^0_{00}+\varphi^1_{2\_000}m1^0_{10}=1,$$
$$\varphi^0_{2\_000}m1^1_{00}+\varphi^1_{2\_000}m1^1_{10}=0.$$

Далее, по аналогичной схеме, получаем набор уравнений для всех примеров. Из которых с учетом ограничений унитарности составляем оптимизационную задачу:

$$
(3) \qquad \begin{gathered}
\varphi^0_{2\_000} m1^0_{00} + \varphi^1_{2\_000} m1^0_{10} + \varphi^0_{2\_100} m1^1_{00} + \varphi^1_{2\_100} m1^1_{10} + \\
+\varphi^0_{2\_100} m1^0_{01} + \varphi^1_{2\_100} m1^0_{11} + \varphi^0_{2\_010} m1^1_{00} + \varphi^1_{2\_010} m1^1_{10} + \\
+\varphi^0_{2\_110} m1^1_{10} + \varphi^1_{2\_110} m1^1_{11} + \varphi^0_{2\_101} m1^1_{00} + \varphi^1_{2\_101} m1^1_{10} + \\
+\varphi^0_{2\_011} m1^0_{01} + \varphi^1_{2\_011} m1^0_{11} + \varphi^0_{2\_111} m1^0_{01} + \varphi^1_{2\_111} m1^0_{11} \xrightarrow[M_1,\varphi_2]{} \max .
\end{gathered}
$$

Кроме того, имеем ограничения, выписанные на основе анализа конфликтов между уравнениями, составленными для разных ступеней.
$\varphi_{2\_000}\varphi_{2\_010} = 0$; $\varphi_{2\_110}\varphi_{2\_100} = 0$; $\varphi_{2\_000}\varphi_{2\_101} = 0$; $\varphi_{2\_110}\varphi_{2\_011} = 0$; $\varphi_{2\_110}\varphi_{2\_111} = 0$.

Решение задачи (3): $\tilde{M}_1 = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \end{bmatrix}$ и вектор $\tilde{\varphi}_2 = \left(\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} \right)$. На основе полученных значений вектора дискретной функции $\varphi_2(k_{(L_2)})$ составляем таблицу данных для второй ступени декомпозиции функции, например, на основе разбиения $\lambda_2 = \left(k_{(4)}, k_{(2,3)}\right)$ имеем запись функции $f = \varphi_2(\tilde{l}_4, \varphi_3(\tilde{l}_2, \tilde{l}_3))$, в столбец f помещаем значения функции $\varphi_2(k_{(L_2)})$ и решаем задачу на основе обновленного набора данных, подобно тому как сделано на первом этапе. Таким образом, путем последовательного решения ряда задач по синтезу отдельных матриц решается задача синтеза МКО. Однако может оказаться и так, что у рассматриваемой задачи существует сразу несколько решений $\varphi_r(k_{(L_{ir})})$ и $\varphi_c(k_{(L_{ic})})$ с соответствующими M_i, тогда возникает задача отбора из них более перспективных для использования на следующих уровнях декомпозиции. В разделе 3.4 описывается метод поиска неиспользуемых ячеек в матрицах применяемый для анализа МКО.

Важно отметить отличия предложенных методов от методов, предложенных А.О. Алексеевым, T. Luba, H. Selvaraj, B. Zupan, M. Perkowski и другими. В данной работе изложены методы, позволяющие синтезировать МКО на основе табличных данных, полных бинарных деревьях на l именованных листьях, в заданной шкале, с использованием матриц размерности $\kappa\times\kappa$, где κ – шкала значений индикатора. Как было сказано таким образом построенный МКО – это экономный аппроксиматор, так как для построения

МКО нам нужно найти только $(l-1)\kappa^2$ переменных. В методах, предлагаемых коллегами, рассматривается задача поиска модели на основе заданной структуры без ограничений на размерность матриц.

В разделе 4.1, **главы 4**, на основе теоретических результатов предыдущих глав приводится описание работы модулей программного комплекса для синтеза и анализа МКО. В разделе 4.2 приводится общий алгоритм анализа и синтеза МКО. Предложенный алгоритм реализован в программном коде на основе модулей, описанных в разделе 4.1. На примере решения прикладных задач демонстрируются методика анализа и синтеза МКО.

В разделе 4.3 на примере булевых функций демонстрируется работа алгоритма по синтезу матриц МКО. Задача синтеза булевых функций имеет долгую историю, некоторые подходы к решению были освещены в разделе 1.8. Рассмотрен ряд задач по синтезу МКО на основе функций двух, трех и четырех переменных, в двоичной и троичной шкалах. Например, приводятся результаты для типичного примера проверки подходов к обучению ИИ, синтез функции *XOR* $f(x_1, x_2) = (x_1 \wedge \bar{x}_2) \vee (\bar{x}_1 \wedge x_2)$.

В разделе 4.4 мы рассматриваем четыре примера синтеза МКО на основе неполных наборов данных, чтобы продемонстрировать возможности предложенного подхода к синтезу МКО. Приводятся результаты синтеза МКО, для примера введенного в таблице 1.

На данных по оценке финансовой устойчивости ряда российских компаний в сфере строительства из работы исследователей А. Носковой и А. Алексеева демонстрируется ситуация, когда не удается найти МКО, реализующий предоставленные данные в рамках заданной шкалы. Лучшая реализация достигается на структуре: $M_1l_3M_2l_4M_3l_5M_4l_1l_2$ матрицы для нее приведены в таблице 3. В этом случае приводится решение задачи синтеза, для которого шкала переменных матриц свертки была увеличена. В шкале 5 удалось синтезировать несколько МКО, реализующих все примеры обучающего набора. А.О. Алексееву с коллегами удалось синтезировать МКО, для данного набора, на основе предложенного ими метода в шкале 10.

Таблица 3 – Матрицы из решения задачи по оценке финансовой устойчивости ряда российских компаний в сфере строительства, для структуры $M_1l_3M_2l_4M_3l_5M_4l_1l_2$.

Матрицы			
M_1	M_2	M_3	M_4
0 1 2 2 2 2 0 0 2	2 2 0 2 0 1 2 2 2	2 0 1 0 1 1 1 1 1	1 0 1 0 1 1 1 1 2

На примере задачи синтеза основанной на данных оценки дизайн-проектов студентов Уральского государственного архитектурно-художественного университета (УРГАХУ) для условий крайнего севера из школы арктического дизайна, демонстрируются возможности структурного анализа. Данные заданы в шкале 3 и используются следующие параметры: l_1 – актуальность, l_2 – экономика, l_3 – этика (экология), l_4 – эстетика (образ), l_5 – техническая часть. Кодирование оценок осуществлялось экспертом. По результатам структурного анализа присоединение первого листа l_1 «актуальность» к верхней матрице M_1 позволяет реализовать набор в любой из структур МКО, реализующих все заданные примеры. То есть с точки зрения декомпозиции параметр «актуальность» не зависит от других, мы можем его отделить. Если же в дереве к верхней матрице присоединяется l_4 «Эстетика (образ)», то набор не реализуется ни в какой из возможных структур, что говорит о принципиальной недекомпозируемости, т.е. взаимозависимости критериев с параметром «эстетика (образ)».

Набор данных для четвертого примера сгенерирован на основе МКО для оценки степени достижения приемлемого уровня эффективности обеспечения безопасности полетов при определении уровня научно-технологического задела работ в авиастроении. Данный пример иллюстрирует возможность предлагаемого подхода к точному восстановлению МКО, синтезированных экспертным путем на основе ограниченного числа обучающих примеров. На основе рассмотренного четвертого примера, в разделе 4.5 рассматривается вопрос синтеза прогнозной системы. Подобно методу случайного леса результаты успешно обученных МКО используются для предсказания и управления. Из 555 примеров из полного набора, не вошедших в обучающий набор, система прогнозирования на основе пяти синтезированных МКО верно предсказывает значения 210 примеров, при этом для 93 из них наблюдается единогласие – все пять МКО определяют значение комплексной оценки такое же, как и в исходном полном наборе. Представление МКО на основе бинарных деревьев дает возможность решать такие задачи управления значением комплексной оценки как обеспечение максимального ее значения при наличии ограничений на значения входных показателей, а также изменение ее значения за счет изменения минимального числа входных показателей полиномиально от числа входных переменных.

На приведенных примерах показано, что предлагаемый подход к анализу позволяет:

- Исследовать возможность декомпозирующего (древовидного) представления модели, описывающей предоставленные данные.
- Проводить структурный анализ вклада отдельных переменных в итоговое значение.

- Исследовать анализ влияния отдельных переменных и групп переменных на итоговое значение агрегирующего показателя.
- Исследовать монотонность обучающего набора дискретных данных.
- Выделять целевые примеры для дальнейшего уточнения параметров МКО.
- Прогнозировать результаты для недостающих примеров как по отдельным МКО, так и по совокупности нескольких МКО.

В **заключении** приведены основные результаты работы. На основе исследования литературы были сформированы основные задачи решение которых обеспечивает достижение поставленной цели диссертационного исследования.

1. Разработаны методы записи, синтеза и сокращения множества рассматриваемых структур полных бинарных деревьев, позволяющие выбирать перспективные структуры для задачи синтеза матриц МКО.
2. Разработаны методы синтеза матриц МКО заданной размерности на основе наборов дискретных данных: методы синтеза матриц рассматриваемой структуры МКО для случаев полного и неполного наборов данных, декомпозиционный метод синтеза для неполного набора данных.
3. Предложен общий алгоритм анализа и синтеза МКО. Алгоритм разработан с использованием предложенных методов анализа и синтеза, и впервые реализован в виде комплекса программ. Разработанный комплекс программ позволяет осуществлять анализ и синтез механизмов комплексного оценивания на основе наборов дискретных данных.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах/сборниках из Перечня ВАК (категория К1)

1. Бурков В.Н., Сергеев В.А., Коргин Н.А. Идентификация механизмов комплексного оценивания на основе унитарного кода // Управление большими системами: сборник трудов. – 2020. – № 87. – С. 67–85.

2. Сергеев В.А. Синтез механизмов комплексного оценивания на основе разделительной декомпозиции // Проблемы управления. – 2022. – № 6. – С. 3–13.

Статьи в журналах, индексированных в международных базах данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендацией ВАК

3. Sergeev V.A., Korgin N.A. Identification of Integrated Rating Mechanisms As An Approach To Discrete Data Analysis // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, Issue 13. – P. 134–139.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

4. Korgin N., Sergeev V. Identification of Integrated Rating Mechanisms on Complete Data Sets / Proceedings of IFIP WG 5.7 International Conference "Advances in Production Management Systems" (APMS 2021) (Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems). – 2021. – Vol. 630. – P. 610–616.

5. Burkov V.N., Korgin N.A., Sergeev V.A. Identification of Integrated Rating Mechanisms as Optimization Problem // Proceedings of 13th International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD). – 2020. – P. 1–5.

В сборниках трудов конференций

6. Сергеев В.А. Идентификация механизмов комплексного оценивания с применением разделительной декомпозиции // Труды 18-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2022, Челябинск). – 2022. – С. 546–552.

7. Коргин Н.А., Кравчук С.Г., Сергеев В.А. Проблемы согласования интересов в проектах развития инфраструктуры, обеспечивающей функционирование легкого внедорожного электротранспорта / Материалы 14-й Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2021, Дивноморское, Геленджик). – 2021. – Т. 2. – С. 155–157.

8. Коргин Н.А., Сергеев В.А. Выбор структур при решении задач идентификации механизмов комплексного оценивания для полных наборов данных / Материалы 14-й Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2021, Дивноморское, Геленджик). – 2021. – Т. 2. – С. 158–160.

9. Сергеев В.А. Коргин Н.А. Исследование чувствительности дискретной функции для решения задачи синтеза МКО на основе дискретных наборов данных / Материалы 16-й Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2023, Волгоград). – 2023. – Т. 2. – С. 345–348.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

10. Сергеев В.А., Коргин Н.А. Сборщик полных бинарных деревьев на именованных листьях на основе данных анализа групп эквивалентности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618561 РФ; Зарег. 26.04.2023.

Вклад автора в совместные публикации:

В работах [1, 5] – разработка методов синтеза матриц МКО. Проведение численных экспериментов. Разработка методов записи, синтеза и отбора структур полных бинарных деревьев.

В работе [4] – разработка метода синтеза матриц МКО для полного набора данных. Разработка алгоритма выбора полного бинарного дерева на именованных листьях.

В работах [3, 7, 8, 9] – проведение численных экспериментов.

В работе [10] – разработка алгоритма сборщика полных бинарных деревьев и программная реализация.

Научное издание

Сергеев Владимир Александрович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАБОРОВ ДИСКРЕТНЫХ ДАННЫХ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат $60 \times 90/16$.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № .

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
117997
ул. Профсоюзная д. 65
Россия, Москва
www.ipu.ru