

16. Rogozov Yu.I., Sviridov A.S. Kontseptsiya postroeniya metodologicheskikh informatsionnykh sistem [The concept of methodological information systems], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2014, No. 2, pp. 11-14.
17. Tao Yue, Lionel C. Briand, Labiche Y. A systematic review of transformation approaches between user requirements and analysis models, *Requirements Engineering*, 2011, pp. 75-99.
18. Fatna Belqasmi and Roch Glitho, Concordia University Chunyan Fu, Tekelec «RESTful Web Services for Service Provisioning in NextGeneration Networks: A Survey». IEEE IEEE Communications Magazine. December, 2011.
19. Official Congressional Biography, Allard Kenneth Lowenstein, published by Office of the Clerk, U.S. House of Representatives, accessed March 26, 2011.
20. Gasfild D. Stroki, derev'ya i posledovatel'nosti v algoritmakh: Informatika i vychislitel'naya biologiya [Strings, trees and sequences in algorithms: computer science and computational biology]: translation from English I.V. Romanovskogo. St. Petersburg: Nevskiy Dialekt, 2003, 654 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Обуховец.

Липко Юлия Юрьевна – Южный федеральный университет; e-mail: jullipko@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 49, кв. 21; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; доцент.

Lipko Yulia Ur'evna – Southern Federal University; e-mail: jullipko@gmail.com; 49, Chekhov street, ap. 21, Taganrog, 347900, Russia; the department of SAiT; associate professor.

УДК 004.891.2

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-122137

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых

ИЗВЛЕЧЕНИЕ АТРИБУТОВ ИЗ ГРАФОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛОВ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ ДЛЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ*

В данной работе мы представляем новый подход для развития базы знаний продукционной экспертной системы (ЭС) на основе свойств причинно-следственных отношений между атрибутами логического вывода. Предлагается использовать нечеткие когнитивные карты, представляющие собой нечеткие ориентированные взвешенные знаковые графы с циклами обратной связи, как базу для генерации набора антецедентов и консеквентов нечетких правил ЭС, основанной на механизме нечеткого логического вывода. Полученная на этой основе база знаний использует системные качества для повышения интеллектуальности логического вывода. Современные графы имеют высокую степень размерности и многочисленные циклы, что значительно затрудняет эвристическое определение атрибутов логического вывода. Проблема коррекции коэффициентов передачи обратных связей разрешается путем приведения матрицы смежности (насколько это возможно) к верхнему (или нижнему) треугольному виду с использованием квадратичных функционалов механистической аналогии (барьерного штрафа и «инверсных»). Первый тип функционалов является знакоопределенным, выпуклым, поэтому процесс минимизации имеет единственное решение, достижимое любыми методами 0-го и 1-го порядка. Функционалы второго типа являются неограниченными, но, поскольку производится постоянное отображение действительно-значного решения на целочисленные перестановки, то задача также имеет решение, достижимое теми же методами. Представлен алгоритм минимизации функционала методом попарных сравнений. Показано, что алгоритм является вычислительно эффективным, соответствующим $O(n^3)$ затрат. Проведена серия вычислительных экспериментов для анализа и сравнения качества получаемых решений, а также обоснования выбора лучшего функционала. Эксперимент показал эффективность для матриц размером

* Данная работа произведена при поддержке гранта Российского Фонда фундаментальных исследований № 16-01-00098.

$10^3 \times 10^3$, а для матриц очень большой размерности (Big Data) потребует решения проблема накопления ошибок округления при вычислениях с плавающей точкой. Произведена оценка семи типов функционалов механистической аналогии на основе критериев реализуемости, производительности, результативности и применимости для предметной области. Описан подход, заключающийся в последовательной трансформации исходной матрицы нечеткой графовой модели с использованием двух типов функционалов качества, что позволяет генерировать атрибуты производственной ЭС.

Экспертные системы; ориентированные знаковые взвешенные циклические графы; функционалы на основе механистической аналогии.

A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh

EXTRACTION OF ATTRIBUTES FROM GRAPHS USING THE MECHANISTIC ANALOGY FUNCTIONALS FOR EXPERT SYSTEMS

In this paper we present a new approach to the development of the knowledge base of production Expert System (ES) based on the properties of cause-and-effect relations between the attributes of a logical inference. It is proposed to use fuzzy cognitive maps, which are represented by fuzzy weighted signed directed graphs with feedback cycles; the graph stands as a base to generate antecedents and consequents set of the fuzzy rules to the ES based on the fuzzy inference engine. The resulting knowledge base uses the system qualities to improve the intelligence of logical inference. Modern graphs have a high degree of dimensionality and multiple cycles, which greatly complicate the heuristic definition of attributes of logical inference. The problem of correction of the feedback gear ratio is resolved by reducing the adjacency matrix (as it possible) to the upper (or lower) triangular form using the quadratic functionals of the mechanistic analogy (barrier penalty, "inverse"). The first type is a fixed signed convex functionals, so the minimization process has a unique solution obtained by any methods of the 0-th and 1-th order. Functionals of the second type are unbounded, but, as it is constantly mapping a real-valued solution to integer permutations, so the problem has also a solution that is obtained with the same methods. Minimization algorithm of functional presented by the paired comparisons method is presented. It is shown that the algorithm is computationally efficient, relevant to $O(n^3)$ time hardness. We conducted a series of numerical experiments to analyze and compare the quality of the solutions, as well as determine the best functional. The experiment showed efficiency for the matrix size of $10^3 \times 10^3$. The algorithm would require to solve the problem of accumulation of rounding errors in floating point for very large matrices (big data). Evaluation of the seven types of mechanistic analogies functional based on feasibility, performance, effectiveness and applicability of the subject area has been implemented. The approach of a sequence transformation of the original matrix of fuzzy graph model with two types of qualities functional is described. It allows generating the attributes of production ES.

Expert systems; signed directed weighted cyclic graphs; functionals based on a mechanistic analogy.

Введение. В экспертных системах (ЭС), в том числе производственного типа, основанных на механизме нечеткого логического вывода, процесс извлечения знаний является одним из основных и наиболее сложным этапом в их построении [1, 2]. Задача моделирования процесса приобретения (извлечения) знаний экспертов предметной области является одним из главных «узких мест» технологии ЭС, определяющих их эффективность [3–6].

Основными методологическими подходами, применяемыми для извлечения правил логического вывода с привлечением экспертов, являются различные группы методов опроса, анкетирования, интервьюирования и т.п. Однако в некоторых недоопределенных слабоформализуемых средах (области менеджмента, социальные и экономические системы) возникают ситуации, в которых трудно, а порой и невозможно, напрямую (экспертно) идентифицировать не только атрибуты правил (consequents, antecedents), но и выделить конкретную проблемную задачу в управляемой системе. Часто задача сформулирована лишь в общих чертах для системы в целом, без выделения конкретных управляемых параметров.

Автоматизация выработки набора входных-выходных данных (антецедентов, консеквентов) для нечетких правил, особенно в недоопределенных слабоформализуемых средах, остается недостаточно исследованной задачей.

В таких системах задача разработки математического инструментария для обработки модели предметной области, генерирующего атрибуты ЭС, становится очевидной. Решение данной проблемы предлагается на основе интеграции когнитивного моделирования и анализа с экспертной системой.

В качестве формальных моделей таких систем выступают нечеткие графы и гиперграфы. Одним из вариантов графовых представлений исследуемой системы являются когнитивные модели, представляемые в виде нечетких когнитивных карт, предложенных Коско. Нечеткие когнитивные карты на основе причинно-следственных связей (в виде ориентированных взвешенных дуг) между элементами (характеристиками, концептами) управляемой системы сравнительно легко создать. Однако это требует определенного времени и вызывает трудности проверки моделей на адекватность, правильность и точность их настройки.

Графическое представление модели поведения системы в виде нечеткой когнитивной карты позволяет понимать, какие концепты системы влияют на другие концепты и в какой степени, но при этом общее поведение системы очень трудно понять, а также выделить из нее какие-либо ключевые элементы. Это связано как с большой размерностью графа, так и с наличием многочисленных обратных связей (сложность концептов и отношений между ними). Размеры современных графов превышают возможности человеческого восприятия, поэтому стандартное представление графа теряет свою информативность.

Одно из возможных решений заключается в *многоуровневом представлении* исходного графа через объединение его вершин в группы или сообщества. Важно, однако, чтобы при группировке вершин не утратилось информационное содержание графа. Выделение сообществ позволяет анализировать и исследовать свойства графа без утраты информации о его структуре [7].

Для генерации атрибутов логического вывода ЭС на основе нечеткой графовой модели представляется обоснованным использование процедур *кластеризации и выявления отклика системы*. Тогда актуальными становятся задачи одновременного выделения и сообществ в графе (т.е. подмножеств вершин), и причинно-следственных связей (т.е. последовательностей дуг).

В данной работе решается задача нахождения порядка индексов вершин, на котором достигается оптимальное значение некоторого функционала качества, что позволяет осуществить кластеризацию нечеткой графовой модели, на основе которой будет формироваться набор входных-выходных данных экспертной системы.

Связанные работы. В научных исследованиях, посвященных проблемам выработки методов автоматической генерации правил нечеткой логики, представлены методы интеллектуального анализа данных: адаптивные генетические алгоритмы; нейронные сети; нечеткие деревья решений; техники субтрактивной кластеризации, Takagi- Sugeno- Kang, TSK; нечеткие и гибридные методы; алгоритмы Мамдани, мультиагентные алгоритмы; нечеткий формальный анализ концептов; алгоритм извлечения ассоциативных правил; DOC-BASED метод; NextClosure алгоритм; параллельный подход и др.

Как правило, в исследованиях отражаются вопросы оптимизации имеющегося набора нечетких правил, либо выработки набора нечетких правил на основе перечня атрибутов, полученных от экспертов.

Во всяком случае, решения предлагаются от исходного изначального набора входных выходных данных с определенными связями между ними, в том числе с пересекающимися областями взаимодействий. При этом большинство задач предметной области разработаны для характеристик (атрибутов), имеющих возможности для их численного измерения.

Теория нечетких графов и гиперграфов системно изложена в литературе. Существует большое разнообразие алгоритмов кластеризации графов в зависимости от постановок задач, критериев качества, заложенных в алгоритмы принципов и предназначением для обработки соответствующих данных. Так, рассматриваются алгоритмы на основе:

- ◆ меры близости или сходства, например, по длине – евклидово расстояние, манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов), расстояние Чебышева, расстояние Махаланобиса, степенное расстояние и т.п. [8];
- ◆ раскраски вершин графа при различных ограничениях (минимальное число компактных групп, заданное число красок, заданное число красок с ограничением на количество соцветных вершин и др.) [9];
- ◆ использование аппарата нечетких множеств и выбор транзитивно ближайших сообщений (жадная оптимизация, многоуровневая оптимизации функционала) [10];
- ◆ собственных векторов матрицы модулярности, в т.ч. с использованием некоторой эвристики [11, 12];
- ◆ вычисления кратчайших путей [13, 14];
- ◆ расчёта потоков [15, 16, 17];
- ◆ максимальной встречаемости меток среди смежных вершин [18];
- ◆ случайных блужданий [19];
- ◆ выделения устойчивых подмножеств графа [20] и др.

Приведенные алгоритмы предназначены для решения только какой-либо одной из требуемых задач.

В отличие от взаимоисключающих действий приведенных выше алгоритмов решение задачи минимизации квадратичного функционала качества на основе единообразных действий способно выявлять как сообщества, так и причинно-следственные связи. Рассмотрение проблемы с этой позиции может привести к указанию новых представлений на основе дробно-рациональных функций, сохраняющих не только непрерывность исходного функционала, но также и гладкость, а, возможно, и выпуклость (при определённых условиях).

Порядку нумерации n -вершин ставится в соответствие точка в n -мерном действительном пространстве. Различные порядки нумерации вершин могут иметь для графа различное значение. Поэтому вводится соответствующая функция n действительных переменных – функционал качества, достигающая на более подходящих для данной конкретной задачи перестановках вершин оптимальное значение.

Это позволяет привлечь методы оптимизации функций нескольких действительных переменных и может иметь дополнительные эффекты, например, при минимизации (оптимизации) градиентными методами. Каждая переменная получает новое значение, т.е. вырабатывается направление, изменяющее значения сразу всех переменных. Это же может служить основой для организации целенаправленного перебора в множестве перестановок нумерации вершин.

3. Методы. Рассмотрим конечный граф $G = \langle V, E \rangle$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – конечное множество вершин, n – количество вершин, $E = \{(v_j, v_k) | v_j \in V, v_k \in V\}$ – конечное множество дуг. Графу G соответствует матрица смежности $A = \|a_{jk}\|_{n \times n}$, где вес a_{jk} дуги (v_j, v_k) может выражать наличие дуги (булево значение), кратность дуги, вес дуги, нечёткую меру смежности вершин v_j и v_k и др.

В графе могут существовать структуры. Это выразится и в структурированности матрицы смежности. Портрет матрицы смежности зависит от последовательности нумерации вершин. При изменении порядка $\langle 1, 2, \dots, n \rangle$ нумерации вершин на $\langle i_1, i_2, \dots, i_n \rangle$ будет изменяться и портрет матрицы смежности. Выявление структур в портрете матрицы смежности означает выявление структур в исходном графе. Если выполнить непрерывное продолжение множества перестановок $\langle i_1, i_2, \dots, i_n \rangle$ индексов вершин на множество действительных чисел $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R_n$, то для поиска наилучших упорядочений можно применить методы оптимизации функций нескольких действительных переменных $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ [21].

При этом в общем случае, в целевой функции оптимизационной задачи могут быть учтены не только исходные данные о самом графе, но и информация о достигнутом на очередной итерации взаимном расположении вершин.

Следует иметь в виду, что изначально речь идёт о поиске наилучшего упорядочения вершин графа, поэтому процесс оптимизации в пространстве действительных чисел должен неизбежно отображаться на множество перестановок индексов вершин. Необходимое отображение действительно-значных решений (x_1, x_2, \dots, x_n) на множество перестановок $\langle i_1, i_2, \dots, i_n \rangle$ будет проявлять себя «шоками», способными изменить соотношение производительностей алгоритмов. Тем не менее, ставится задача удерживать получаемые алгоритмы в границах $O(n^3)$ затрат.

Обобщением изложенного подхода будет его применение не только к задачам квадратичного программирования, но и к задачам минимизации функционалов достаточно общего вида. Существование решения задачи минимизации будет обеспечиваться не ограниченностью снизу значений функционалов, а конечной мощностью множества перестановок индексов вершин графа G . Другими словами, фактически будут решаться задачи условной оптимизации. Желательным требованием будет выпуклость минимизируемых функционалов, хотя бы нестрогая, для единственности решений рассматриваемых задач и для независимости результатов процессов оптимизации от выбора начальных приближений.

Рассмотрим граф причинно-следственных связей большой размерности, созданный в результате опроса мнений экспертов и выражающий влияния в системе управления. Для выстраивания эффективного управления предлагается упростить граф, объединяя в сообщества вершины с похожими векторами откликов на возмущения, исходящие от воздействия на отдельные вершины графа. Получить отклики этих векторов можно с помощью *метода обратного распространения ошибки*. Но для возможности работы алгоритма необходима устойчивость системы управления, выражаемой ориентированным графом, то есть обратные связи, существующие в силу существования в графе циклов, должны быть не только отрицательными, но и коэффициенты передач обратных связей должны находиться в границах допустимых областей. При этом проблемы совершенно не возникает, если в графе циклы просто отсутствуют.

С другой стороны, в создаваемой ЭС циклов в графе также не должно быть (по возможности). Если в графе существует цикл, то ненулевые элементы матрицы смежности, соответствующие рёбрам графа будут располагаться как выше, так и ниже диагонали матрицы смежности. Верно и противоположное к обратному – если в матрице смежности ориентированного графа нет ненулевых элементов выше (или ниже) её диагонали, то в самом конечном графе не может быть циклов. Для исключения циклов (или для коррекции коэффициентов передачи обратных связей) предлагается привести матрицу смежности (насколько это возможно) к *верхнему (или нижнему) треугольному* виду. При этом если остаются ненулевые

элементы ниже (выше) диагонали, то экспертам предлагается пересмотреть значение (или влияние) дуг графа, соответствующих этим элементам. После этого не составляет проблемы получение векторов откликов для каждой вершины графа, и решается задача выделения сообществ.

Тогда может быть предложен подход, называемый *Генератором самоконструируемых атрибутов* (ГСА), заключающийся в последовательной трансформации исходной матрицы нечеткой графовой модели с использованием двух типов функционалов качества, что, по сути, позволяет генерировать атрибуты производной ЭС (рис. 1).

Последовательность алгоритма ГСА можно резюмировать следующим образом:

I. Первичная трансформация матрицы – приведение к верхнетреугольному виду.

Ia. Выбор функционала качества для первичной трансформации матрицы.

Ib. Инициализация первичной трансформации матрицы M_0 к верхнетреугольному виду – матрица M_1 .

Ic. Экспертиза ненулевых элементов ниже (выше) диагонали матрицы.

Id. Получение верхнетреугольной матрицы M_1 .

II. Кластеризация матрицы с использованием функционала на основе механистической аналогии

IIa. Выбор функционала качества для второй трансформации матрицы – кластеризации.

IIb. Проведение кластеризации матрицы M_1 с формированием кластеров $\{C_i\}$.

III. Получение откликов на возмущения в виде набора векторов откликов (матрица M_2).

IV. Оценка полученных результатов.

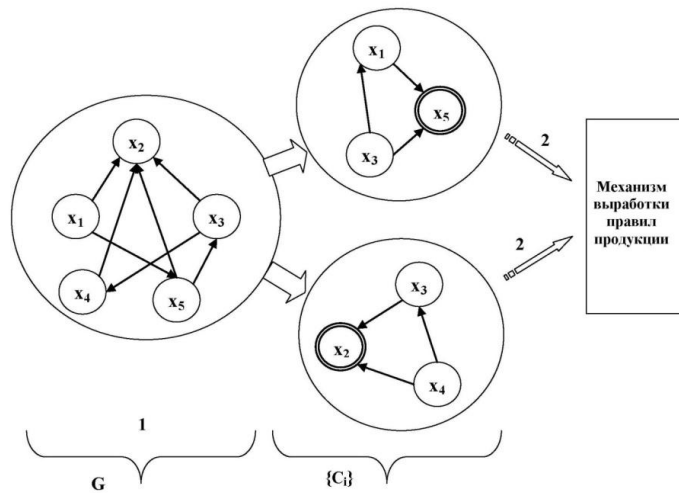


Рис. 1. Схема генерации атрибутов в модуле извлечения знаний ЭС:
 $I - \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$ множество вершин исходного графа; $2 - \{x_2, x_5\}; \{x_1, x_3, x_4\}$
 множества консеквентов и антецедентов, соответственно; G – исходный граф;
 $\{C_i\}$ – множество кластеров.

Далее рассмотрим процедуру приведения матрицы смежности M_0 к верхнетреугольному виду M_1 на основе выбора функционала качества.

Среди квадратичных функционалов рассмотрим следующий:

$$\Phi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} (x_j - x_k)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Функционал (1) можно интерпретировать как потенциальную энергию пружинной механической системы, в которой a_{jk} является жёсткостью пружины, а $|x_j - x_k|$ – её растяжением.

В силу одного из основных принципов физики, механическая система стремится к минимуму своей потенциальной энергии. В результате минимизации функционала (1) вершины, связанные дугами с большей «пружинной жёсткостью», должны получить в порядке индексов, по возможности, соседние индексы. Тем самым будут выявлены или кластеры, или причинно-следственные связи (или одновременно и то, и другое, в зависимости от решаемой задачи).

От функционала, слагаемые которого являются нечётными функциями,

$$\Phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} (x_j - x_k)^3 \rightarrow \min \quad (2)$$

стоит ожидать, что индексы i_k вершин v_k , для которых преобладает количество входящих дуг (то есть в большей степени претендующих на роль вершин-следствий), в результате минимизации получают большие значения $i_k > i_j$, чем индексы i_k вершин v_k , для которых преобладает количество исходящих дуг (т.е. в большей степени претендующих на роль вершин-причин).

В различии между чётностью и нечётностью слагаемых функционалов (1) и (2) проявляется противоположность приоритетов в решаемых задачах выделения сообществ тяготеющих друг к другу вершин графа и причинно-следственных связей в графе. Но вместе с этим, к решению задач с противоположными приоритетами применим единый рассматриваемый подход.

Слагаемые функционала

$$\Phi_3(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} (x_j - x_k) \rightarrow \min \quad (3)$$

также являются нечётными функциями, но при минимизации градиентными методами, в отличие от функционала (2), будет учитываться только информация о графе без сведений о достигнутом порядке вершин.

Если избирательность функционалов (2) и (3) окажется недостаточной, то предлагается её усиление за счёт использования функционала

$$\Phi_4(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} f_\varepsilon(x_k - x_j) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где

$$f_\varepsilon(x) = \begin{cases} 1/x, & x > \varepsilon > 0, \\ (1/\varepsilon)(1 + (1 - x/\varepsilon) + (1 - x/\varepsilon)^2), & x \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (5)$$

Функцию $f_\varepsilon(x)$ можно рассматривать как *барьерную функцию* или как *функцию штрафа*, быстро возрастающую при $x_k - x_j \leq 0 \leq \varepsilon$, т.е. в случае, если вершина v_k , для которой преобладает количество входящих дуг (вершина-следствие), получает меньшее значение индекса $i_k < i_j$, чем индекс i_j вершины v_j , для которой преобладает количество исходящих дуг (вершина-причина).

Выражение $f_2(x) = (1/\varepsilon)(1 + (1 - x/\varepsilon) + (1 - x/\varepsilon)^2)$ является разложением в ряд Тейлора функции $f_1(x) = 1/x$ в окрестности точки $x = \varepsilon$, а $\varepsilon > 0$ – параметр штрафа. Барьерная функция $f_\varepsilon(x)$ при $x > \varepsilon$ совпадает с функцией $1/x$, а при $x < \varepsilon$ и отрицательных значениях является гладким продолжением функции $1/x$ до вторых производных включительно в точке перехода $x = \varepsilon$, знакоопределенной и не содержит разрывов 2-го рода. И при уменьшении значения ε , достаточно быстро растущей, порождает высокие штрафы за недостижение результата.

Дополнениями функционалов (1)–(4) служат «инверсные» функционалы:

$$\Phi_5(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} \left((x_j - l)^2 + (u - x_k)^2 \right) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\Phi_6(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} \left((x_j - l)^3 + (u - x_k)^3 \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$\Phi'_3(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} \left((x_j - l) + (u - x_k) \right) \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$\Phi_7(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk} \left(f_\varepsilon(l - x_j) + f_\varepsilon(x_k - u) \right) \rightarrow \min. \quad (9)$$

В этих функционалах индексы i_j вершин v_j , для которых преобладает количество исходящих дуг (вершин-причин), в результате минимизации тяготеют к нижнему значению индексов l . Индексы i_k вершин v_k , для которых преобладает количество входящих дуг (вершин-следствий), в результате минимизации тяготеют к верхнему значению индексов u . Возможны следующие значения пар: $(l = 0, u = n - 1)$, $(l = 1, u = n)$, $(l = 0, u = n)$ или др. Линейные функционалы Φ_3 и Φ_3' , с точки зрения задачи минимизации эквиваленты.

Пусть $w_{i,j}$ – улучшение значения функционала при перестановке i -ой и j -ой вершин, которое для функционалов $\Phi_2 - \Phi_7$ соответственно имеют вид:

$$w_{ij}^{(2)} = \sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{ki} + a_{kj} - a_{jk}) \left((x_i - x_k)^3 - (x_j - x_k)^3 \right); \quad (10)$$

$$w_{ij}^{(3)} = (x_i - x_j) \sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{ki} + a_{kj} - a_{jk}); \quad (11)$$

$$w_{ij}^{(3')} = (x_i - x_j) \sum_{k=1}^n (a_{ki} - a_{ik} + a_{jk} - a_{kj}); \quad (12)$$

$$w_{ij}^{(4)} = \sum_{k=1}^n (a_{ki} - a_{kj}) \left(f(x_j - x_k) - f(x_i - x_k) \right) + \sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{jk}) \left(f(x_k - x_j) - f(x_k - x_i) \right) + (a_{ij} + a_{ji}) \left(f(x_i - x_j) + f(x_j - x_i) \right); \quad (13)$$

$$w_{ij}^{(5)} = (x_i - x_j) \left((x_i + x_j - 2d) \sum_{k=1}^n (a_{jk} - a_{ik}) + (2u - x_i - x_j) \sum_{k=1}^n (a_{ki} - a_{kj}) \right); \quad (14)$$

$$w_{ij}^{(6)} = \left((u - x_j)^3 - (u - x_i)^3 \right) \sum_{k=1}^n (a_{ki} - a_{kj}) + \left((x_i - d)^3 - (x_j - d)^3 \right) \sum_{k=1}^n (a_{jk} - a_{ik}); \quad (15)$$

$$w_{ij}^{(7)} = \left(f(u - x_j) - f(u - x_i) \right) \sum_{k=1}^n (a_{ki} - a_{kj}) + \left(f(x_j - d) - f(x_i - d) \right) \sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{jk}). \quad (16)$$

Алгоритм минимизации функционалов методом попарных сравнений (двух индексов вершин на случай их возможной перестановки) имеет вид:

Algorithm 1: Минимизации функционалов механистической аналогии**Require:** N – число вершин; $\|a_{i,j}\|$ – матрица смежности; ε – пороговое значение.**Ensure:** $\|v_i\|$ – вектор перестановки индексов вершин, на которой достигается минимальное значение функционала; f – значение функционала.

```

1.  $f_N = \text{HUGE}$ ;  $f_N$  – значение функционала;
2. repeat
3.    $f_0 \leftarrow f_N$ ; обновляем «старое» значение;
4.   for  $i:=1$  to  $n$  do
5.     for  $j:=1$  to  $n$  do begin, для каждой пары вершин выигрыш –
        улучшение значение функционала;
6.        $w_{i,j} \leftarrow s_{i,j}$ ; выигрыш = стартовому значению;
7.       for  $k:=1$  to  $n$  do
8.          $w_{i,j} \leftarrow w_{i,j} + \Delta w_{i,j,k}$ ; суммирование вкладов в выигрыш
            (10)÷(16)
9.        $w_{i,j} \leftarrow (x_i - x_j)w_{i,j}$ ;
        endfor
10.     $min \leftarrow 0$ ;  $k = l = 0$ ;
11.    for  $i:=1$  to  $n$  do
12.      for  $j:=1$  to  $n$  do
13.        if ( $w_{i,j} < min$ ) then
14.           $min \leftarrow w_{i,j}$ ;  $l = i$ ;  $k = j$ ; поиск пары вершин,
            максимально минимизирующих
            значение функционала;
        endif
15.      if ( $min < 0$ ) then
16.         $i = v_k$ ;  $v_k = v_l$ ;  $v_l = i$ ; обмен пары вершин, максимально
            улучшающих значение функционала;
        endif
17.     $f_N \leftarrow 0$ ;
18.    for  $i:=1$  to  $n$  do
19.      for  $j:=1$  to  $n$  do
20.         $f_N \leftarrow f_N + \Delta f_{i,j}$ ; вычисление «нового» значения
            функционала (2)÷(9);
    until ( $f_N \geq f_0$ ).

```

4. Численный эксперимент. Рассмотрим в качестве примера граф со следующей матрицей смежности:

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}
v_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_3	0	0	0	0,54	0,8	0	0	0,73	0	0	0	0	0	0
v_4	0	0,73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_5	0	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,63	0	0	0
v_6	0,73	0	0	0	0,55	0	0	0,68	0	0	0	0	0	0
v_7	0	0	0	0	0,9	0	0	0,85	0	0	0	0	0	0
v_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_9	0,73	0	0	0	0	0	0	0,67	0	0	0	0	0	0
v_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,45	0	0	0
v_{11}	0	0	0	0	0	0	0	-0,35	0	0	0	0	0	0
v_{12}	0	0	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_{13}	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_{14}	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	-0,54	0	0	0

Функционал Φ_1 предназначен не для приведения матрицы смежности к верхнетреугольному виду, поэтому здесь не рассматривается.

Раздел IV. Анализ данных и управление знаниями

В результате минимизации функционалов Φ_2 и Φ_3 за счет изменения порядка вершин ниже диагонали остаются пять дуг $\langle v_{12}, v_3 \rangle$; $\langle v_{13}, v_3 \rangle$; $\langle v_{14}, v_4 \rangle$; $\langle v_5, v_1 \rangle$; $\langle v_8, v_1 \rangle$:

$\Phi_{2/3}$	v_3	v_7	v_6	v_4	v_9	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{10}	v_1	v_{11}	v_2	v_5	v_8
v_3	0	0	0	0,54	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0,8	0,73
v_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,85
v_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0,68
v_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,63	0,9	0	0
v_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,67
v_{12}	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_{13}	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_{14}	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	-0,54	0	0	0
v_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,45	0	0	0
v_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,35
v_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0	0	0	0
v_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0	0	0	0

В результате минимизации функционала Φ_4 ниже диагонали не остаётся ни одной дуги:

Φ_4	v_{12}	v_{13}	v_7	v_{14}	v_3	v_6	v_{10}	v_4	v_9	v_{11}	v_5	v_8	v_2	v_1
v_{12}	0	0	0	0	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_{13}	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,85	0	0
v_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	-0,54	0	0	0	0
v_3	0	0	0	0	0	0	0	0,54	0	0	0,8	0,73	0,73	0
v_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0,68	0	0
v_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,45	0	0	0	0
v_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,63	0	0	0,9	0
v_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,67	0	0
v_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,35	0	0
v_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73
v_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73
v_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Функционалы Φ_5 и Φ_7 в результате минимизации также приводят к совпадающему решению – ниже диагонали остаются две дуги $\langle v_{12}, v_3 \rangle$; $\langle v_{13}, v_3 \rangle$:

$\Phi_{5/7}$	v_7	v_6	v_{14}	v_9	v_3	v_{12}	v_4	v_{10}	v_{13}	v_5	v_{11}	v_8	v_1	V_2
v_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0,85	0	0
v_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0	0,68	0	0
v_{14}	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	-0,54	0	0	0
v_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,67	0	0
v_3	0	0	0	0	0	0	0,54	0	0	0,8	0	0,73	0	0,73
v_{12}	0	0	0	0	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,63	0	0	0,9
v_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,45	0	0	0
v_{13}	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0
v_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,35	0	0
v_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0
v_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Минимизация функционала Φ_6 также оставляет ниже диагонали две дуги $\langle v_{11}, v_8 \rangle$; $\langle v_{13}, v_3 \rangle$. Таким образом, результаты показывают, что наилучший результат показал функционал Φ_4 (ноль дуг), чуть хуже – совпадающие результаты функционалов Φ_5 и Φ_7 (две дуги), а также Φ_6 (две дуги). Различие между результатами этих пар функционалов состоит в допустимой перестановке некоторых вершин. Функционалы Φ_2 , Φ_3 показали наихудшие результаты (пять дуг) (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов минимизации функционалов

Ф	Дуги, остающиеся ниже диагонали					
	$\langle v_{12}, v_3 \rangle$	$\langle v_{13}, v_3 \rangle$	$\langle v_{14}, v_4 \rangle$	$\langle v_5, v_1 \rangle$	$\langle v_8, v_1 \rangle$	$\langle v_{11}, v_8 \rangle$
Φ_2	+	+	+	+	+	
Φ_3	+	+	+	+	+	
Φ_4						
Φ_5	+	+				
Φ_6		+				+
Φ_7	+	+				

По весу дуг, оставшихся ниже диагонали, функционал Φ_6 показал лучший результат, чем функционалы Φ_5 и Φ_7 (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики дуг графа после минимизации функционалов на матрице 14x14

Характеристики графа	Функционал					
	Φ_2	Φ_4	Φ_3	Φ_5	Φ_6	Φ_7
Тип Функционала:						
«инверсные»				▼	▼	▼
барьерного штрафа	▼	▼	▼			
Матрица 14 × 14						
Число дуг до минимизации	12					
Число дуг после минимизации	11	0	5	2	2	2
Приращение числа дуг ниже диагонали, %	-8,3	-100,0	-58,3	-83,3	-83,3	-83,3
Вес дуг до минимизации	7,3					
Вес дуг после минимизации	6,7	0	2,66	1,0	0,75	1,0
Приращение веса дуг ниже диагонали, %	-8,2	-100,0	-63,5	-86,3	-89,7	-86,3

Далее рассмотрим две матрицы на основе реальных данных:

- ♦ 75×75 с 411 дугами общим весом 216.5, ниже диагонали располагалось 219 дуг с суммой весов 109.3;
- ♦ 143×143 с 923 дугами общим весом 222.3, ниже диагонали располагалось 389 дуг с суммой весов 197.5.

Графы заведомо содержат множественные циклы. Оставшееся после минимизации функционалов число дуг ниже диагонали и их общий вес приведены в табл. 3.

Лучший результат в обоих случаях показали функционалы Φ_5 и Φ_7 . Достижимое уменьшение числа и веса дуг ниже диагонали – 50–56 %. Также необходимо отметить, что «худший» результат минимизации «инверсных» функционалов Φ_5 , Φ_6 , Φ_7 оказывается лучше «лучшего» результата минимизации функционалов Φ_2 , Φ_3 (рис. 2).

Таблица 3

Характеристики дуг графа ниже диагонали после минимизации функционалов

Характеристики графа	Функционал					
	Φ_2	Φ_4	Φ_3	Φ_5	Φ_6	Φ_7
Тип Функционала: «инверсные» барьерного штрафа				▼	▼	▼
Матрица 75 × 75						
Число дуг до минимизации	219					
Число дуг после минимизации	135	139	105	98	103	98
Приращение числа дуг ниже диагонали, %	-38,36	-36,53	-52,05	-55,25	-52,97	-55,25
Вес дуг до минимизации	109,3					
Вес дуг после минимизации	68,6	69,5	51,7	47,2	49,6	47,2
Приращение веса дуг ниже диагонали, %	-37,24	-36,41	-52,70	-56,82	-54,62	-56,82
Матрица 143 × 143						
Число дуг до минимизации	389					
Число дуг после минимизации	279	254	216	199	213	198
Приращение числа дуг ниже диагонали, %	-28,28	-34,70	-44,47	-48,84	-45,24	-49,10
Вес дуг до минимизации	197,5					
Вес дуг после минимизации	139,3	130,2	106,2	97,8	104,9	97,10
Приращение веса дуг ниже диагонали, %	-29,47	-34,08	-46,23	-50,48	-46,89	-50,84

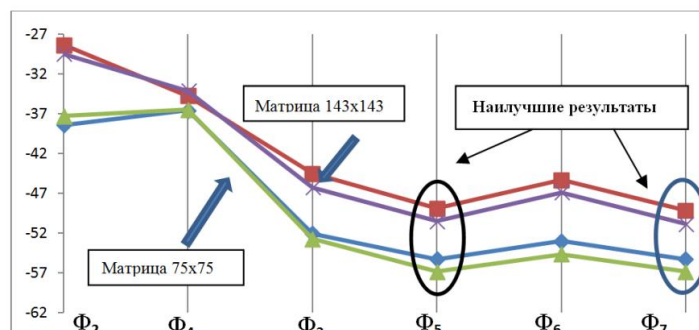


Рис. 2. Приращения числа дуг и суммы весов дуг ниже диагонали, % по каждому функционалу F

Оценка производительности показала, что одна итерация минимизации функционалов Φ_4 и Φ_7 занимает в несколько раз больше времени за счет вычислений значений функции штрафа Φ_5 , но показывает лучшие результаты (рис. 3). Для «инверсных» функционалов время вычисления значительно ниже, в то время как достигаемые результаты оказываются не хуже или лучше Φ_2 , Φ_3 . Поэтому для графов большой размерности выбор в пользу функционала Φ_6 может иметь решающее значение. Заметим также, что функционал Φ_6 является квадратичным, что подтверждает высказанный выше положительный отзыв в пользу задач квадратичного программирования.

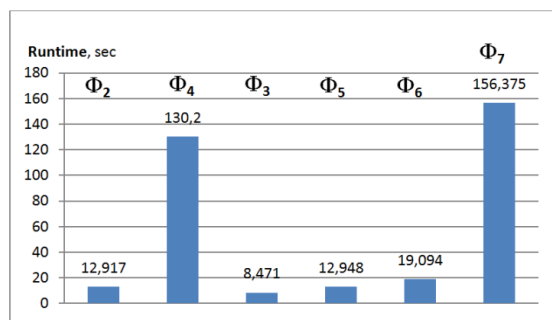


Рис. 3. Время вычислений минимизации функционалов для матрицы 143×143 , sec.

Таким образом, полученный результат показывает положительные возможности приведения матрицы смежности (насколько это возможно) к верхнему треугольному виду при значительном (до 50–60 %) уменьшении циклов обратной связи. Достигнуто снижение размерности анализируемых структур исходной графовой модели. Ненулевые элементы ниже диагонали, могут быть рассмотрены экспертами на предмет пересмотра и уточнения значений дуг графа, соответствующих этим элементам. После этого возможно решать задачи кластеризации и получения векторов влияний и откликов, которые и будут служить основанием для формирования атрибутов ЭС,

5. Обсуждение результатов. Оценка алгоритма минимизации функционалов механистической аналогии может быть произведена на основе следующих критериев:

1. Применимость для предметной области.

Проведенные исследования показали применимость данного подхода с использованием функционалов на основе механистической аналогии для анализа нечетких ориентированных взвешенных знаковых графов, имеющих циклы и выражающие причинно-следственные связи. Данный алгоритм позволяет свести к минимуму или исключить циклы обратных связей в сложных слабоформализуемых системах.

2. Реализуемость.

Функционалы Φ_1 , Φ_3 , Φ_4 , Φ_5 , Φ_7 являются знакоопределенными, т.е. ограничены снизу нулевыми значениями, выпуклыми, поэтому процесс минимизации даже в постановке задачи безусловной оптимизации, имеет *единственное решение*, достижимое любыми методами 0-го и 1-го порядка. Методы 2-го порядка потеряют свою эффективность из-за необходимости отображения действительно-значного решения на целочисленную перестановку.

Функционалы Φ_2 , Φ_3 , Φ_3' , Φ_6 являются неограниченными, но, поскольку производится постоянное отображение действительно-значного решения на целочисленные перестановки, то задача также имеет решение, достижимое теми же методами.

3. Производительность.

В зависимости от используемого компьютерного процессора время решения задачи для матриц малой и средней размерности (до 200 узлов) составляет секунды. Минимизация всех функционалов происходит монотонно и не требует вмешательства пользователя. Функции пользователей состоят в переключении с одного функционала на другой. Поэтому алгоритм является вычислительно эффективным, соответствующим $O(n^3)$ затрат.

4. Результативность.

Выбор функционала осуществляется пользователем по результатам вычислений. Показано, что результат минимизации «инверсных» функционалов Φ_5 , Φ_6 , Φ_7 оказывается лучше результата минимизации функционалов Φ_2 , Φ_3 . Функционал Φ_4 может показать наилучшие результаты при определенных условиях. Результативность функционалов определяется уровнем сложности (число вершин, связей, плотность связей, число циклов обратной связи и т.п.) исходного графа. При этом необходимо учитывать, что время вычисления функционалов Φ_4 и Φ_7 значительно выше, чем остальных за счет вычислений значений функции штрафа.

Выводы. Предложенный ГСА подход развития базы знаний продукционной экспертной системы на основе свойств причинно-следственных отношений между атрибутами логического вывода использует нечеткие когнитивные карты, представляющие собой нечеткие ориентированные взвешенные знаковые графы с циклами обратной связи, как базу для генерации набора антецедентов и консеквентов нечетких правил ЭС, основанной на механизме нечеткого логического вывода.

Решение задачи коррекции коэффициентов передачи обратных связей сводится к приведению матрицы смежности (насколько это возможно) к *верхнему (или нижнему) треугольному* виду с использованием квадратичных функционалов механистической аналогии (барьерного штрафа и «инверсных»). Проведенный эксперимент показал эффективность для матриц размером $10^3 \times 10^3$, а для матриц очень большой размерности (Big Data) проблема накопления ошибок округления при вычислениях с плавающей точкой. Выходом могут служить целочисленные вычисления, когда нечеткие меры фактически переводятся в соответствующие целочисленные уровни. Но возникнет проблема значительного сужения диапазона представимых компьютерных чисел.

Корректность решения задачи минимизации функционалов механистической аналогии (существование решения, возможность получения решения и единственность решения, достижимое любыми методами 0-го и 1-го порядка) обеспечивается его выпуклостью. Алгоритм применим для нечетких знаковых ориентированных взвешенных графов с причинно-следственными связями и не накладывает требований к графам быть отношениями порядка и выполнения условий устойчивости.

Задача разработки ГСА подхода не является тривиальной в новом контексте постановки проблемы, так как основой выработки входных-выходных данных для правил нечеткого вывода является ментальное представление работы недоопределенной слабоформализуемой системы в виде нечеткого ориентированного взвешенного знакового графа с циклами обратной связи. Полученная на этой основе база знаний будет использовать системные качества для повышения интеллектуальности логического вывода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Gaines B.R., Shaw M.L.G.* Eliciting Knowledge and Transferring it Effectively to a Knowledge-Based System // In: IEEE Trans. Knowl. Data Eng. IEEE Press, New York, 1993. – No. 5 (1). – P. 4-14
2. *Nasuti F.W.* Knowledge Acquisition Using Multiple Domain Experts in the Design and Development of an Expert System for Disaster Recovery Planning. Doctoral Thesis Proposal. Nova Southeastern University, 2000. – 206 с.
3. *Feigenbaum E.A.* The Art of Artificial Intelligence: Themes and Case Studies of Knowledge Engineering // In Proceedings Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1977. – P. 1014-1029.
4. *Hayes-Roth F., Waterman D.A.D., Lenat B.* Building Expert Systems. – London: Addison-Wesley, 1983. – 444 с.
5. *Bing W., Chenyan Z.* Dynamics of Knowledge Acquisition via E-Learning Community. JCIT 8. – 2013. – P. 168-175.

6. *Kadhim M.A., Alam M.A., Kaur H.* A Multi-intelligent Agent Architecture for Knowledge Extraction: Novel Approaches for Automatic Production Rules Extraction // *J. IJMUE.* – 2014. – No. 9 (2). – P. 95-114.
7. *Henry N., Fekete J.-D.* Matrix Explorer: A Dual Representation System to Explore Social Networks // *IEEE Trans Vis Comput graph.* – 2006. – No. 12 (5). – P. 677-684.
8. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Рональд, Штайн К.* Алгоритмы, построение и анализ. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.
9. *Горбатов В.А., Смирнов М.И., Хлытчиев И.С.* Логическое управление распределенными системами. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 287 с.
10. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
11. *Newman M.E.J.* Finding community structure in networks using eigenvectors of matrices // *Physical Review E.* – 2006. – No. 74 (3).
12. *Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E.* Fast unfolding of communities in large networks // *J. Stat. Mech. Theory and Experiment.* – 2008. – No. 10.
13. *Pons P., Latapy M.* Computing communities in large networks using random walks // *JGAA.* – 2006. – No. 10 (2). – P. 191-218.
14. *Ye Y., Jiang Z., Diao X., Du G.* Extended event-condition-action rules and fuzzy Petri nets based exception handling for workflow management // *Expert Syst. Appl.* – 2011. – No. 38 (9). – P. 10847-10861
15. *Girvan V., Newman M.E.J.* Community structure in social and biological networks // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA.* – 2002. – No. 99 (12). – P. 7821-7826.
16. *Zhang L., Du W., Song J.-J., Xiang H.-Y.* Traffic assignment method based on dynamic fuzzy control and fuzzy decision making. *Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao* // *J. Traffic Transportation Engineering.* – 2010. – No. 10 (3). – P. 110-117.
17. *Kristianto Y., Gunasekaran A., Helo P., Hao Y.* A model of resilient supply chain network design: A two-stage programming with fuzzy shortest path // *Expert Syst. Appl.* – 2014. – No. 41 (1). – P. 39-49.
18. *Radhavan U.N., Albert R., Kumara S.* Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks // *Physical Review E.* – 2007. – No. 76 (3).
19. *Goyal S., Grover S.* A fuzzy multi attribute decision making approach for evaluating effectiveness of advanced manufacturing technology - in Indian context // *IJPQM.* – 2013. – No. 11 (2). – P. 150-178.
20. *Hipel K.W., Kilgour D.M., Bashar A.M.* Fuzzy preferences in multiple participant decision making // *J. Scientia Iranica.* – 2011. – No. 18 (3). – P. 627-638.
21. *Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L.* Fuzzy graphs clustering with quality relations functionals in cognitive models // *Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’16); series “Advances in Intelligent Systems and Computing”, Series Vol. 450.* – 2016. – Vol. 1. – P. 349-360.

REFERENCES

1. *Gaines B.R., Shaw M.L.G.* Eliciting Knowledge and Transferring it Effectively to a Knowledge-Based System, *In: IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* IEEE Press, New York, 1993, No. 5 (1), pp. 4-14
2. *Nasuti F.W.* Knowledge Acquisition Using Multiple Domain Experts in the Design and Development of an Expert System for Disaster Recovery Planning. Doctoral Thesis Proposal. Nova Southeastern University, 2000, 206 p.
3. *Feigenbaum E.A.* The Art of Artificial Intelligence: Themes and Case Studies of Knowledge Engineering, *In Proceedings Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence.* Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1977, pp. 1014-1029.
4. *Hayes-Roth F., Waterman D.A.D., Lenat B.* Building Expert Systems. London: Addison-Wesley, 1983, 444 p.
5. *Bing W., Chenyan Z.* Dynamics of Knowledge Acquisition via E-Learning Community. *JCIT* 8, 2013, pp. 168-175.
6. *Kadhim M.A., Alam M.A., Kaur H.* A Multi-intelligent Agent Architecture for Knowledge Extraction: Novel Approaches for Automatic Production Rules Extraction, *J. IJMUE*, 2014, No. 9 (2), pp. 95-114.

7. Henry N., Fekete J.-D. Matrix Explorer: A Dual Representation System to Explore Social Networks, *IEEE Trans Vis Comput graph*, 2006, No. 12 (5), pp. 677-684.
8. Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest Ronal'd, Shtayn K. *Algoritmy, postroenie i analiz* [Algorithms, construction and analysis]. Moscow: Vil'yams, 2005, 1296 p.
9. Gorbatov V.A., Smirnov M.I., Khlytchiev I.S. *Logicheskoe upravlenie raspredelennymi sistemami* [Logical control of distributed systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 287 p.
10. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [Introduction to the fuzzy sets theory]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 432 p.
11. Newman M.E.J. Finding community structure in networks using eigenvectors of matrices, *Physical Review E*, 2006, No. 74 (3).
12. Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks, *J. Stat. Mech. Theory and Experiment*, 2008, No. 10.
13. Pons P., Latapy M. Computing communities in large networks using random walks, *JGAA*, 2006, No. 10 (2), pp. 191-218.
14. Ye Y., Jiang Z., Diao X., Du G. Extended event-condition-action rules and fuzzy Petri nets based exception handling for workflow management, *Expert Syst. Appl.*, 2011, No. 38 (9), pp. 10847-10861
15. Girvan V., Newman M.E.J. Community structure in social and biological networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2002, No. 99 (12), pp. 7821-7826.
16. Zhang L., Du W., Song J.-J., Xiang H.-Y. Traffic assignment method based on dynamic fuzzy control and fuzzy decision making. *Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao, J. Traffic Transportation Engineering*, 2010, No. 10 (3), pp. 110-117.
17. Kristianto Y., Gunasekaran A., Helo P., Hao Y. A model of resilient supply chain network design: A two-stage programming with fuzzy shortest path, *Expert Syst. Appl.*, 2014, No. 41 (1), pp. 39-49.
18. Radhavan U.N., Albert R., Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks, *Physical Review E*, 2007, No. 76 (3).
19. Goyal S., Grover S. A fuzzy multi attribute decision making approach for evaluating effectiveness of advanced manufacturing technology - in Indian context, *IJPQM*, 2013, No. 11 (2), pp. 150-178.
20. Hipel K.W., Kilgour D.M., Bashar A.M. Fuzzy preferences in multiple participant decision making, *J. Scientia Iranica*, 2011, No. 18 (3), pp. 627-638.
21. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L. Fuzzy graphs clustering with quality relations functionals in cognitive models, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'16): series "Advances in Intelligent Systems and Computing", Series Vol. 450*, 2016, Vol. 1, pp. 349-360.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.М. Курейчик.

Целых Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; профессор.

Васильев Владислав Сергеевич – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; кафедра ИАСБ; к.т.н.; доцент.

Целых Лариса Анатольевна – Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ); e-mail: l.tselykh58@gmail.com; 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: +79897207928; кафедра экономики и предпринимательства; к.э.н.; доцент.

Tselykh Alexander Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

Vasilev Vladislav Sergeevich – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; the department IASB; dr. of eng. sc.; the senior lecturer.

Tselykh Larisa Anatolievna – Chekhov Taganrog Institute (branch) of Rostov State University of Economics; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; 48, Initsiativnaya street, Taganrog, 347936, Russia; phone: +79897207928; the department of economics and business; dr. of ec. sc.; the senior lecturer.