

Использование многокритериальных моделей синтеза технологических схем угольных шахт на основе сравнительного многоатрибутного ранжирования и оптимизации

The use of multi-criteria models for the synthesis of technological schemes of coal mines based on comparative multi-attribute ranking and optimization

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-5-118-122>

КРАВЕЦ К.Д.

Аспирант кафедры

«Геотехнологии освоения недр»

Горного института НИТУ МИСИС,

119049, г. Москва, Россия,

e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

КОЗЛОВА О.Ю.

Канд. техн. наук, доцент

кафедры «Высшая математика – 3»

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский

технологический университет»,

119454, г. Москва, Россия,

e-mail: kozlova_ou@mail.ru

В рамках проведенных исследований предлагается методический и методологический подход к синтезу проектных решений технологических систем угольных шахт на основе многоуровневой производственной системы ANFIS, в которой алгоритмические блоки связаны производственным механизмом и процедурой нечеткого вывода (FIS), вводимые функции принадлежности в методических рамках интегрируются с базовым наполнением методом наименьших квадратов. Функциональное ядро алгоритмического обеспечения основано на использовании функций принадлежности на основе базы правил и базы знаний Такаги – Сугено с учетом лингвистического ярлыка и колоколообразной функции.

Ключевые слова: угольная шахта, технологическая система, синтез проектных решений, функция принадлежности, алгоритм Такаги – Сугено, нечеткий вывод.

Для цитирования: Кравец К.Д., Козлова О.Ю. Использование многокритериальных моделей синтеза технологических схем угольных шахт на основе сравнительного многоатрибутного ранжирования и оптимизации // Уголь. 2025;(5):118-122. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-118-122.

Abstract

Within the framework of the conducted research, a methodological and methodological approach is proposed to synthesize design solutions for technological systems of coal mines based on the ANFIS multilevel production system, in which algorithmic blocks are connected by a production mechanism and a fuzzy inference procedure (FIS), the introduced membership functions are integrated into the methodological framework with the basic least squares filling method. The functional core of the algorithmic software is based on the use of membership functions based on the Takagi – Sugeno rule base and knowledge base, taking into account the linguistic label and bell-shaped function.

Keywords

Coal mine, technological system, synthesis of design solutions, membership function, Takagi – Sugeno algorithm, fuzzy inference

For citation

Kravets K.D., Kozlova O.Yu. The use of multi-criteria models for the synthesis of technological schemes of coal mines based on comparative multi-attribute ranking and optimization. *Ugol'*. 2025;(5):118-122. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-118-122.

ВВЕДЕНИЕ

Основная функция базы правил нечеткого вывода, или иначе, базы знаний – это формальное представление опытных или экспертных знаний в той или иной проблемной области (принятия и обоснования проектных решений технологических систем угольных шахт).

Применительно к объектам исследований база знаний системы нечеткого вывода включает правила нечетких продукций, основанных на нормативных документах технологического проектирования и правилах промышленно-экологической безопасности, а также опыт проектирования и основные достижения научно-технического прогресса (наиболее прогрессивные, надежные и экономичные распространенные схемы вскрытия, подготовки и системы разработки в соответствии с принятой современной отечественной и зарубежной классификацией).

Как правило, модельные гибридные представления формализуются на основе нечеткой когнитивной карты и основополагающих целевых элементов нейро-нечеткой сети ANFIS – при этом задействуется основное правило представления всех видов концептов в универсальной программной среде VENSUM [1, 2, 3, 4]. Укрупненная концептуальная модель гибридной когнитивной модели синтеза технологической системы угольной шахты представлена на рис.1.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Системный подход в рамках статьи тесно коррелирует с алгоритмическим обеспечением процедуры синтеза функциональных структур технологических систем угольных шахт, представленным ниже.

Иерархические уровни методологического обеспечения решения поставленной научно-производственной задачи:

1. Итерационный уровень РОИ-гlossарий и понятийное поле исследований, модельное представление объекта исследований (СППР);
2. Итерационный уровень осмысления принципов, законов и закономерностей осуществления проектной деятельности в заявленной проблематичной области;
3. Итерационный уровень. Концепция;
4. Итерационный уровень – научно-методические и системотехнические принципы;
5. Итерационный уровень. Процедуральные проектные правила;
6. Итерационный уровень. Процедуральные проектные процедуры;
7. Итерационный уровень – комплекс аналитических, эмпирических, технологических и технических составляющих проектных решений в области синтеза функциональных структур технологических систем угольных шахт;
8. Итерационный уровень. Процедура оценки исходных условий и ограничений процедуры проектирования, анализа сопутствующих рисков их реализации;
9. Итерационный уровень – методологическое и методическое наполнение заявленной концепции (выбор рациональных вариантов с оптимизацией параметров);
10. Итерационный уровень – оценка эффективности, безопасности и надежности проектных решений в сфере процедуры синтеза;
11. Итерационный уровень – оценка эффективности, безопасности и надежности проектных решений в сфере функционирования технологических систем угольных шахт (динамическое импульсное моделирование).

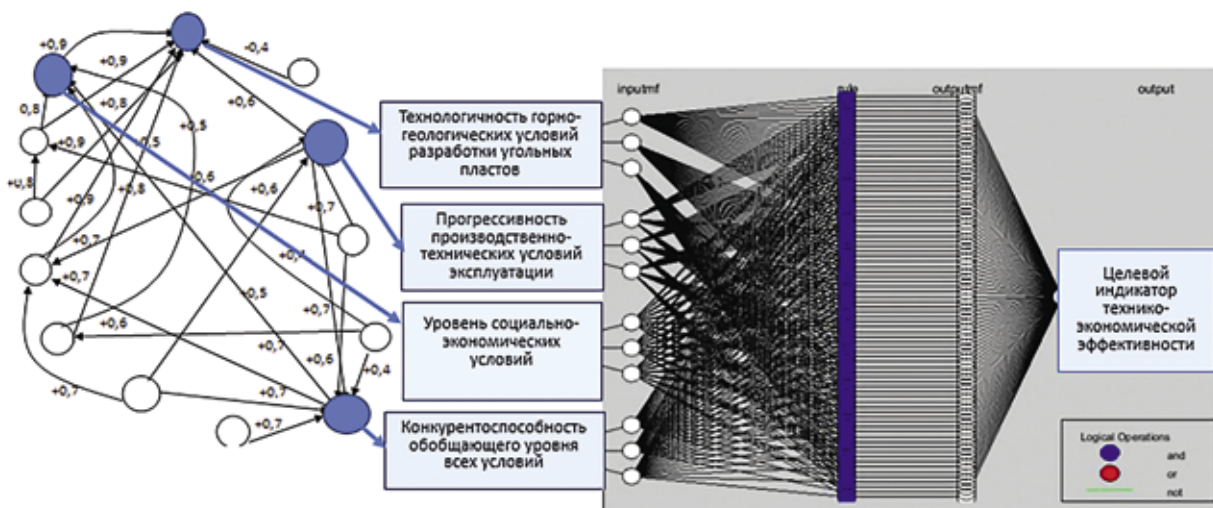


Рис. 1. Укрупненная концептуальная модель гибридной когнитивной модели синтеза технологической системы угольной шахты
 Fig. 1. An enlarged conceptual model of a hybrid cognitive model for the synthesis of a technological system of a coal mine

МЕТОДОЛОГИЯ

Адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS)

В первичном понимании и представлении ANFIS представляет собой многоуровневую продукционную систему, основанную на наличии определенных узлов с прямыми связями, причем траектории их соединения сопровождаются и формируются под воздействием соответствующих прямых коротежей-ссылок. Отличительной особенностью представленной продукционной системы MSDM является то, что воздействие каждого узла на соседние при этом осуществляется сигналами с заданных и строго очерченных интенсивности и производительности. Входные и выходные алгоритмические блоки в ANFIS связаны продукционным механизмом и процедурой нечеткого вывода (FIS) (рис. 2), вводимые функции принадлежности в рамках которых интегрируются с базовым наполнением методом наименьших квадратов.

Внутреннее наполнение архитектуры ANFIS представлено пятью слоями-уровнями (рис. 3). Первый уровень-слой идентифицируется как нечеткий, второй – нормализации, третий – продукционных процедур и правил, четвертый – выходной слой и пятый – де-нечеткий.

Входные (четкие) значения исходных параметров и характеристик (x и y) в количественной форме в шкале отношений поступают в алгоритмические блоки первого уровня, где проходят процедуру преобразования в нечеткие значения, которая реализуется с использованием функционального ядра функций принадлежности на основе базы правил и базы знаний Такаги – Сугено с учетом лингвистического ярлыка и колоколообразной функции.

Модель вывода Такаги – Сугено-Канга

Наибольшую популярность среди нечетких систем адаптивного типа приобрела модель вывода Такаги – Сугено – Канга (TSK). В этой модели функция заключения определяется нечетким, но точечным образом. Благодаря этому дефаззификатор на выходе системы не требуется, а модель вывода значительно упрощается [5, 6]. Общая форма модели TSK может быть представлена в виде:

если x_1 – это A_1 | x_2 – это A_1 | ... | x_N это $-A_N$,
то $y = f^*(x_1, x_2, \dots, x_N)$. (1)

В векторной записи ее можно записать еще проще:

если x это A , то $y = f(x)$, (2)

где $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – четкая функция.

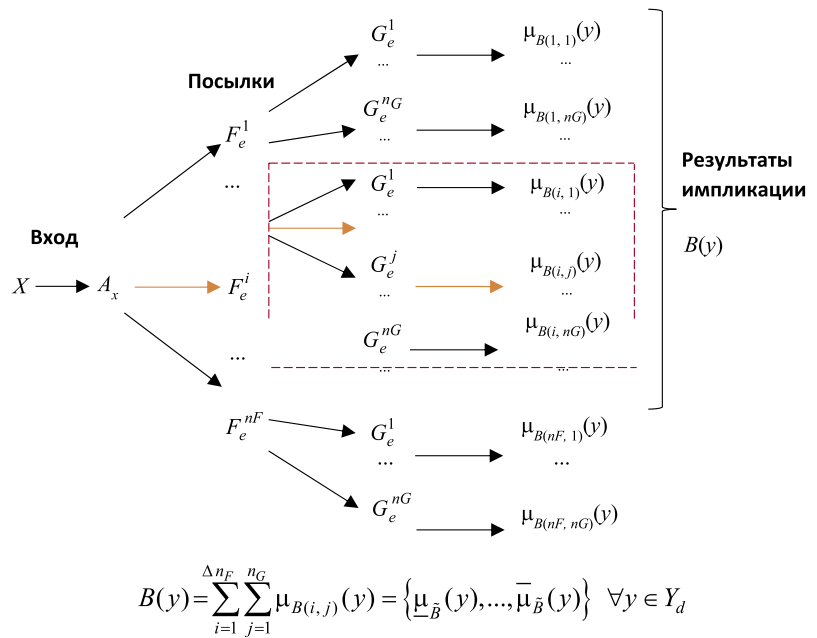


Рис. 2. Организация нечеткого вывода через вложенные ФП в рамках ANFIS
Fig. 2. Organization of fuzzy output through nested OP within the framework of ANFIS

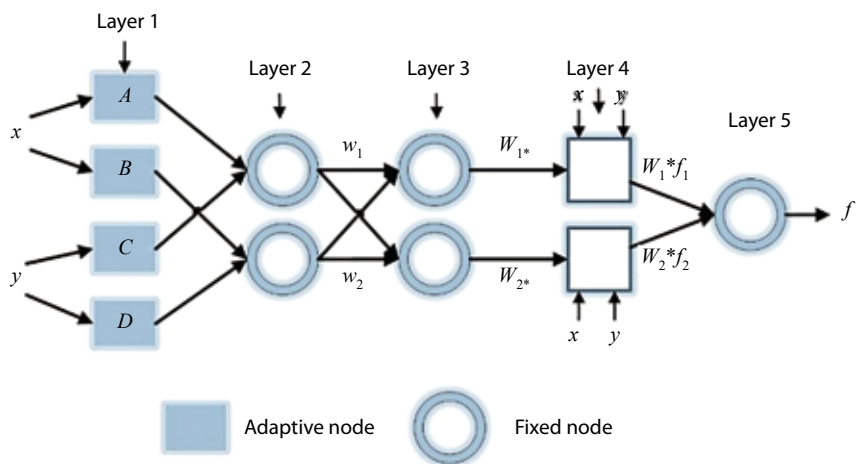


Рис. 3. Архитектурное наполнение ANFIS
Fig. 3. Architectural content of ANFIS

В этой зависимости часть, относящаяся к условию, точно такая же, как и в модели Мамдани-Заде. Принципиальное отличие касается заключения, которое представляется в форме функциональной зависимости, чаще всего – в виде полиномиальной функции нескольких переменных. Классическое представление этой функции, чаще всего используемое на практике, – это полином первого порядка:

$$y = f(x) = p_0 + \sum_{i=1}^N p_i x_i \quad (3)$$

в котором коэффициенты p_0, p_1, \dots, p_N – это цифровые веса, подбираемые в процессе адаптации (обучения). Еще более простая модель вывода TSK получается, если применять функцию $f(x)$ в виде полинома первого порядка, в котором:

$$y = f(X) = p_0 \quad (4)$$

В этом случае значение p_0 можно отождествить с центром заключения c_i модели Мамдани – Заде, присутствующим в соответствующей формуле.

Если в модели вывода TSK используется несколько (M) правил, то выход системы определяется как их средне-взвешенное. Приписывая каждому правилу вес W_i , получим выходной сигнал, представленный в виде:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M W_i y_i}{\sum_{j=1}^M W_j}, \quad (5)$$

или

$$y = \sum_{i=1}^M \frac{W_i}{\sum_{j=1}^M W_j} y_i = \sum_{i=1}^M W_i y_i. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что в выражении (6) веса W_i отвечают условию нормализации:

$$y = \sum_{i=1}^M \frac{W_i}{\sum_{j=1}^M W_j} = 1. \quad (7)$$

Если для каждого i -го правила (где $I = 1, 2, \dots, M$) реализуется функция TSK первого порядка:

$$y_i = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} x_j, \quad (8)$$

то можно получить описание выходной функции модели TSK в форме:

$$y = \sum_{i=1}^M \frac{W_i}{\sum_{j=1}^M W_j} \left(p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} x_j \right), \quad (9)$$

которая линейна относительно всех входных переменных системы x_j для $j = 1, 2, \dots, N$.

Веса W_i , присутствующие в формуле (9), являются нелинейными параметрами функции y . В адаптивных системах они подвергаются обучению для достижения наилучшей приспособленности модели к заданным значениям, тогда как в неадаптивных системах они уточняются для определения уровня активации условия в правиле вывода непосредственно в процессе анализа данных. Подбор этих уровней – это результат агрегирования правил, соответствующих конкретным компонентам вектора x условия; он выполняется с использованием логического или алгебраического произведения так же, как это имело место в модели Мамдани–Заде.

Начальным этапом любого алгоритма нечеткого вывода является создание базы правил.

Следующим этапом алгоритма является ввод нечетких правил вывода, поставленных в соответствие относительно используемых лингвистических переменных.

Базовое правило вывода типа «если – то» называется также нечеткой импликацией [7], принимающей форму: если x – это A , то y – это B , где A и B – это лингвистические значения, идентифицированные нечетким способом через соответствующие функции принадлежности для

переменных x и y . Часть « x – это A » называется условием (предпосылкой), а « y – это B » – следствием (заключением). Импликацию можно записать в сокращенном виде $A \rightarrow B$.

Нечеткое рассуждение – это процедура, которая позволяет определить заключение, вытекающее из множества импликаций [8]. Такое множество при n переменных x может принять вид:

$$\begin{aligned} &\text{если } x_1 \text{ – это } A_1 \text{ и } x_2 \text{ – это } A_2 \text{ и } \dots \text{ и } x_N, \\ &\text{то } y \text{ – это } B. \end{aligned} \quad (10)$$

Переменные x_1, x_2, x_N образуют n -мерный входной вектор x , составляющий аргумент условия, в котором A_1, A_2, \dots, A_N и B обозначают величины соответствующего коэффициента принадлежности $\mu_A(x_i)$ и $\mu_A(y)$. Необходимо обратить внимание, что здесь присутствуют индивидуальные функции принадлежности для каждой переменной x и отдельно для y . Случайное значение функции принадлежности $\mu_A(x)$, где $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ – вектор, относящееся к условию импликации (уровень активации правила), должно в последующем интерпретироваться с использованием введенных ранее нечетких операций. Возможна интерпретация в форме логического произведения множеств либо в форме алгебраического произведения:

$$\mu_A(x) = \min_{i=1, \dots, N} (\mu_A(x_i)); \quad (11)$$

2) интерпретация в форме алгебраического произведения:

$$\mu_A(x) = \prod_{i=1}^N \mu_A(x_i). \quad (12)$$

Приписывание единственного значения функции принадлежности, описывающей многомерное условие, называется агрегированием предпосылки. Каждой импликации $A \rightarrow B$, определенной выражением (12), можно приписать также единственное значение функции принадлежности $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$.

На втором уровне происходят приведение выходных данных первого уровня к сопоставимому виду с точки зрения весов узлов с учетом их значимости и направление их на входные алгоритмические блоки третьего уровня, где на основе используемых продукционных правил и процедур рассчитывается сила влияния конкретного узла по сравнению с соседними.

Четвертый уровень наделен функциями отображения в правомерном изложении выходных целевых индикаторов модели оптимизации, что достигается на основе реализации процедуры дефаззификации.

На пятом уровне выявляется достигнутость процесса обучения модели FIS с учетом пороговых значений, фактически достигнутых и прогнозируемых исходных и следственных параметров. Когда ошибка достигнет пороговых значений, процесс обучения заканчивается.

Выводы

Исходя из условий обеспечения требуемой надежности и объективности процедуры синтеза проектных решений технологических систем угольных шахт целесообразно

использование многокритериальных моделей на основе сравнительного многоатрибутного ранжирования и оптимизации. Когнитивные функции адаптации, сегментации и декомпозиции используются для разбиения пространства целевого поведения на отдельные элементы, а функция синтеза обеспечивает агрегацию действий и согласованность с новым поведением. На функцию синтеза накладываются определенные ограничения в выборе и реализации необходимых сценариев в виде производственных правил и соответствующих алгоритмов их воплощения.

Предложенное методологическое сопровождение когнитивной парадигмы в рамках модельного представления синтеза проектных решений в рамках эволюционной динамики технологической системы позволяет сформировать определенные механизмы в динамике взаимодействия связей и ситуаций, разработать альтернативные сценарии их развития и выработать стратегии оценки генерируемых альтернативных решений. При этом каждая связь со своими типами переменных актуализируется только в строго определенных границах.

Повышение надежности процедуры принятия проектных решений достигается за счет возможности корректировки когнитивной карты в результате увеличения интенсивности импульсного возмущения в процессе динамического моделирования.

Список литературы • References

1. Лабинский А.Ю., Нefeldьев С.А., Бардулин Е.Н. Использование нечеткой логики и нейронных сетей в системах автоматического управления // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2019. № 1. С. 44-50.
Labinsky A.Yu., Nefediev S.A., Bardulin E.N. The use of fuzzy logic and neural networks in automatic control systems. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal "Vestnik Sankt Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii"*. 2019;(1):44-50. (In Russ.).
2. Гатин Р.Р., Бикмухаметов Р.Р. Функции и возможности конструктора *Anfis* для проектирования нечетких нейронных сетей // Наука сегодня: реальность и перспективы. 2019. С. 11-13.
Gatin R.R., Bikmukhametov R.R. Functions and capabilities of the *Anfis* constructor for designing fuzzy neural networks. *Nauka segodnya: realnost' i perspektivy*. 2019:11-13. (In Russ.).
3. Черновалова М.В. Применение нейро-нечетких моделей для управления инновационными проектами на промышленных предприятиях // Энергетика, информатика, инновации. 2018. С. 39-43.
Chernoalova M.V. Application of neuro-fuzzy models for management of innovative projects in industrial enterprises. *Energetika, informatika, innovatsii*. 2018:39-43. (In Russ.).
4. Беляев В.В., Агафонов В.В. Синтез высокопроизводительных и прогрессивных технологических систем угольных шахт. Уголь. 2020. № 11. С. 36-42. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-36-42.
Belyaev V.V., Agafonov V.V. Synthesis of high-performance and advanced technological systems for coal mines. *Ugol'* 2020;(11):36-42. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-36-42.
5. Alves K.S.T.R., de Jesus C.D., de Aguiar E.P. A new Takagi – Sugeno – Kang model to time series forecasting. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;(133):108155.
6. Aslam M.S., Hazrat Bilal, Shahab S. Band et al. Modeling of nonlinear supply chain management with lead-times based on Takagi – Sugeno fuzzy control model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;(133):108131.
7. Гончарко О.Ю. Темпоральная импликация и временные модальности. Вестник Санкт-Петербургского университета. Международные отношения. 2012. № 1. С. 21-26.
Goncharko O.Yu. Temporal implication and temporal modalities. *Vestnik Sankt Petersburgskogo Universiteta. Mezhdunarodnye otnosheniya*. 2012;(1):21-26. (In Russ.).
8. Киселева Э.А., Краева А.А., Савинова Ю.С. Обзор нечеткой логики в управлении // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 3. С. 401-405.
Kiseleva E.A., Kraeva A.A., Savinova Yu.S. Review of fuzzy logic in management. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy "Integral"*. 2019;(3):401-405. (In Russ.).

Authors Information

Kravets K.D. – Postgraduate Student of the Department of "Geotechnologies of Subsurface Development" of Mining Institute of National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Kozlova O.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: kozlova_ou@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.03.2025

Поступила после рецензирования: 16.04.2025

Принята к публикации: 26.04.2025

Paper info

Received March 14, 2025

Reviewed April 16, 2025

Accepted April 26, 2025