

Научная статья

УДК 004.891.2:519.816:681.518

НЕЧЁТКИЕ КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**Григорьев Евгений Константинович, кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-
Петербург, grigorev_e@inbox.ru;**

**Никонов Юрий Юрьевич, кандидат технических наук, Московский
авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия, Москва, nikonov-mai@yandex.ru**

Аннотация. Моделирование эксплуатационных режимов сложных технических объектов, в частности газотурбинных установок, связано с необходимостью учета экспертной неопределенности, нестационарности параметров и неполноты формальных дифференциальных моделей. Цель исследования - разработка метода системного анализа и информационной поддержки принятия управленческих решений, основанного на аппарате нечётких когнитивных карт и обеспечивающего интервальное прогнозирование состояний. В качестве математического инструментария предложено представление весовых коэффициентов причинно-следственных связей в виде треугольных нечетких чисел с последующим применением принципа обобщения Заде и метода α -срезов. Сформулированы достаточные условия сходимости итерационной динамики к нечеткому равновесию, опирающиеся на оценку спектрального радиуса матрицы весов, составленной из мод нечётких коэффициентов и константы Липшица функции активации. Для решения обратной задачи управления разработан итерационный алгоритм подбора воздействий с учётом жёстко заданных технологических ограничений исполнительных органов. На примере 14-концептной модели газотурбинной

установки проанализированы сценарии ступенчатого изменения нагрузки, дрейфа измерительного канала и механической деградации лопаточного аппарата. Выполнено сопоставление с байесовскими сетями и авторегрессионными моделями, обучаемыми по телеметрии. Установлено, что предлагаемый подход, незначительно уступая вероятностным аналогам по точности точечного прогноза, обеспечивает прозрачную интерпретацию причинно-следственных связей и формирует доверительный интервал, ширина которого соответствует реальному разбросу параметров. Полученные результаты применимы для встраивания в существующие АСУ ТП с целью снижения рисков ошибочных операторских решений в условиях развития аварийных ситуаций.

Ключевые слова: нечеткие когнитивные карты, системный анализ, газотурбинная установка, причинно-следственные связи, интервальное прогнозирование, обратная задача управления, α -срезы, информационная поддержка принятия управленческих решений.

Original article

FUZZY COGNITIVE MAPS FOR SYSTEM ANALYSIS AND SUPPORT OF TECHNICAL OBJECT MODE CONTROL

Grigorev Evgenii Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia, grigorev_e@inbox.ru;

Nikonov Iurii Iurevich, Candidate of Technical Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, nikonov-mai@yandex.ru

Abstract. Modeling the operating modes of complex technical facilities, particularly gas turbine units, requires accounting for expert uncertainty, parameter nonstationarity, and the incompleteness of formal differential models. The objective of this study is to develop a method for systems analysis and information support for

management decision-making based on fuzzy cognitive maps and enabling interval state forecasting. The proposed mathematical tool is to represent the weighting coefficients of cause-and-effect relationships as triangular fuzzy numbers, followed by application of the Zadeh generalization principle and the α -slice method. Sufficient conditions for the convergence of the iterative dynamics to fuzzy equilibrium are formulated, based on an estimate of the spectral radius of the weight matrix composed of fuzzy coefficient modes and the Lipschitz constant of the activation function. To solve the inverse control problem, an iterative algorithm for selecting actions is developed, taking into account the strictly defined technological constraints of the actuators. Using a 14-concept gas turbine model as an example, scenarios of step load changes, measurement channel drift, and mechanical degradation of the blade assembly were analyzed. A comparison was made with Bayesian networks and autoregressive models trained using telemetry. It was found that the proposed approach, while slightly inferior to probabilistic analogs in point forecast accuracy, provides a transparent interpretation of cause-and-effect relationships and generates a confidence interval whose width corresponds to the actual parameter spread. The obtained results are applicable for integration into existing automated process control systems to reduce the risk of erroneous operator decisions during emergency situations.

Keywords: fuzzy cognitive maps, systems analysis, gas turbine unit, cause-and-effect relationships, interval forecasting, inverse control problem, α -slices, information support for management decision-making.

Введение. Проблема построения адекватных моделей поведения технических объектов со слабо формализуемыми внутренними связями остаётся одной из центральных задач системного анализа. Речь идёт о ситуациях, когда технологический процесс или эксплуатационный режим описывается совокупностью взаимосвязанных факторов, количественная оценка которых недоступна на этапе проектирования либо принципиально невозможна по причине многофакторной природы протекающих явлений [1], [2]. Классический

аппарат дифференциальных уравнений, передаточных функций и пространства состояний предполагает возможность полной идентификации параметров и однозначного описания переходных процессов, что для промышленных установок, энергетических контуров, робототехнических комплексов и других объектов с распределённой структурой управления оказывается невыполнимым условием [3].

Исторически первым шагом к формализации качественных знаний стала методология когнитивных карт, предложенная Р. Аксельродом в середине 1970-х гг. для анализа решений в политической сфере [4]. Р. Аксельрод рассматривал когнитивную карту как знаковый ориентированный граф, вершины которого соответствуют переменным концептам, а рёбра фиксируют направление причинного влияния - усиливающего либо подавляющего. Матрица смежности карты позволяет вычислять центральность концептов, строить матрицы достижимости и выполнять цепочки причинных рассуждений. Однако бинарный характер весов рёбер (только +1, 0 или -1) делает эту конструкцию слишком жёсткой для описания технических систем, где интенсивность причинно-следственной связи между температурой реактора и расходом хладагента допускает градации «незначительно влияет», «существенно воздействует», «в определённых условиях подавляет» [5], [6].

Ответом на указанное ограничение послужила концепция нечётких когнитивных карт (НKK), введённая Б. Коско в 1986 году [7]. Б. Коско расширил конструкцию, наделив каждое причинное ребро степенью принадлежности из частично упорядоченного множества значений, чтобы отражать размытую интенсивность каузального воздействия между концептами. Графовая структура обеспечивает распространение каузального влияния в прямом и обратном направлениях. Кроме того, допускается объединение отдельных карт для расширения базы знаний. В работе Б. Коско обоснована нечёткая каузальная алгебра, в которой оператор косвенного (опосредованного) влияния вдоль цепочки реализуется как минимаксная композиция: минимум весов рёбер

цепочки, а суммарное влияние по всем путям - максимум таких минимумов. Менее жёсткая числовая формализация исходных суждений упрощает их формулирование экспертами и повышает согласованность оценок, а графовое представление обеспечивает формальную строгость последующего логического вывода [8].

В контексте системного анализа и управления техническими объектами нечёткие когнитивные карты занимают промежуточное положение между экспертными системами и аналитическими моделями. Как отмечено в [9], НКК представляют собой нечёткие динамические системы с обратной связью: изменение значения одной вершины распространяется по рёбрам, воздействует на смежные концепты и в конечном счёте может вернуться к исходному узлу, формируя стационарное состояние или колебательный режим. Данное свойство делает их пригодными для моделирования именно тех объектов, где обратные связи определяют устойчивость и переключение эксплуатационных режимов. Более того, НКК объединяют в себе черты нечёткой логики, нейросетевых архитектур и семантических сетей, что открывает возможность обучения весовых коэффициентов по экспериментальным данным с сохранением экспертной компоненты [10].

Необходимость обращения к нечётким весам при моделировании технического объекта обусловлена тем, что:

- процессы деградации материалов (износ трущихся пар, старение изоляции обмоток) протекают медленно и многофакторно, что делает их точное аналитическое описание нецелесообразным;

- 2) технолог, формулирующий правила регулирования, оперирует категориями «сильный перегрев», «умеренная вибрация», «слабый запас устойчивости», а требование указать однозначное числовое значение приводит к нестабильности оценок, зависящих от условий проведения экспертного опроса;

- 3) параметры установки дрейфуют с течением времени, сезонные нагрузки меняют рабочую точку, а переход на новое сырьё или иной сорт топлива сдвигает

статические и динамические свойства контура.

Указанные явления не могут быть адекватно описаны в рамках модели с фиксированными коэффициентами и требуют аппарата, допускающего дифференцированную и адаптивную оценку силы влияния.

В рамках системного анализа и управления техническими объектами НКК позволяют решить следующие задачи. На этапе анализа они дают возможность выявить доминирующие причинные цепочки, оценить центральность концептов и обнаружить скрытые контуры положительной обратной связи, угрожающие устойчивости режима. При синтезе управляющих воздействий НКК служат основой для построения системы поддержки принятия решений: оператор получает прогноз развития ситуации при гипотетическом изменении входных факторов, а автоматизированная система формирует рекомендации по корректировке уставок. В ходе обработки информации матричное представление карты обеспечивает эффективный расчёт матриц достижимости и совокупного причинного влияния, что особенно ценно при большом числе концептов и разреженной структуре связей. Б. Коско в приложении к своей работе показал, что возведение матрицы смежности в последовательные степени позволяет перечислить все пути заданной длины, а суммирование степеней даёт матрицу полной достижимости, диагональ которой служит критерием наличия циклов.

Развитие методологии НКК за прошедшие четыре десятилетия привело к появлению многочисленных расширений: нечётких серых когнитивных карт, реляционных НКК, динамических НКК с онлайн-подстройкой весов, многоуровневых иерархических конструкций. Авторы [3] систематизировали подходы к обучению весов на основе нелинейного правила Хебба, эволюционных алгоритмов и многошаговых градиентных процедур, продемонстрировав применимость каждого из них к задачам прогнозирования многомерных временных рядов, управления промышленными процессами и диагностирования повреждений конструкций. Настоящая работа направлена на разработку метода интеграции НКК в контур оперативного управления

газотурбинной установкой с учётом нестационарности параметров и требований существующих АСУ ТП.

Формальная модель НКК. Основой когнитивной карты в том виде, в каком она была предложена Р. Аксельродом и впоследствии обобщена Б. Коско, является множество концептов - переменных величин, отражающих существенные стороны моделируемого объекта. Применительно к техническому объекту, функционирующему в режиме непрерывного или дискретного управления с малым периодом квантования, множество концептов структурируется по функциональному назначению каждого концепта в контуре регулирования. В настоящей работе рассматривается газотурбинная установка (ГТУ) средней мощности, работающая в составе энергоблока, и для неё выделяются пять групп концептов:

1. Управляющие воздействия: угол поворота направляющего аппарата компрессора, расход топлива, подаваемый в камеру сгорания, и положение регулирующего клапана на линии охлаждения.

2. Регулируемые переменные, непосредственно характеризующие рабочий процесс: частота вращения ротора, температура газов за турбиной, давление в камере сгорания и расход рабочей среды через проточную часть.

3. Возмущающие факторы внешнего и внутреннего происхождения: отклонение температуры атмосферного воздуха от номинального значения, изменение электрической нагрузки на валу генератора, а также деградация лопаточного аппарата, проявляющаяся в постепенном снижении аэродинамического КПД компрессора.

4. Диагностические признаки: уровень вибрации опорных подшипников, признак нештатного режима, фиксируемого системой защиты, и рассогласование между заданной и фактической частотой вращения.

5. Ограничения: максимально допустимая температура металла лопаток, предельное значение вибрационного ускорения и минимально допустимый расход охлаждающего воздуха.

Обозначим полное множество концептов как $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, где $n = 14$ для рассматриваемой ГТУ. Каждому концепту C_i в дискретный момент времени k ставится в соответствие скалярная величина $A_i(k) \in [0, 1]$, интерпретируемая как нормированная степень активации данного концепта. Б. Коско показал, что причинно-следственные связи между концептами удобно кодировать матрицей весов $W = (w_{ij})_{n \times n}$, элемент w_{ij} которой выражает интенсивность каузального влияния концепта C_i на концепт C_j . Положительное значение w_{ij} свидетельствует об усиливающем воздействии, отрицательное - о подавляющем, а нулевое значение указывает на отсутствие прямой причинной связи. В классической когнитивной карте Р. Аксельрода допустимы лишь значения из множества $\{-1, 0, +1\}$; в нечёткой когнитивной карте, предложенной Коско, элементы матрицы принимают значения из непрерывного отрезка $[-1, 1]$ либо, в более общей трактовке, из произвольного частично упорядоченного множества P [11].

Динамика состояний концептов описывается итерационным уравнением, являющимся дискретным аналогом нелинейной системы с обратной связью. В наиболее распространённой форме, зафиксированной в [12], обновление вектора состояний $A(k) = (A_1(k), \dots, A_n(k))^T$ выполняется по правилу (1):

$$A_j(k + 1) = f \left(\bigwedge_{i \neq j} A_j(k) + \sum_{i \neq j} w_{ij} \cdot A_i(k) \right) \bigvee_{j=1, \dots, n} \quad (1)$$

где

f - функция активации, преобразующая суммарное взвешенное воздействие на концепт в значение из заданного ограниченного диапазона. В качестве f чаще всего используются сигмоида $f(x) = 1/(1 + e^{-\lambda x})$ с параметром крутизны $\lambda > 0$ либо кусочно-линейная функция насыщения, ограничивающая выход отрезком $[0, 1]$.

Матричное представление карты позволяет вычислять матрицы достижимости путём последовательного возведения W в степени и суммирования результатов вплоть до $(n - 1)$ -й степени, поскольку в

ациклическом графе не существует путей длиннее $n - 1$ рёбер. Диагональ суммарной матрицы $T = \sum_{k=1}^{n-1} W^k$ служит индикатором наличия циклов: если хотя бы один диагональный элемент отличен от нуля, соответствующий концепт участвует в контуре обратной связи (таблица 1).

Таблица 1 - Классификация концептов нечёткой когнитивной карты ГТУ

Группа	Обозначение концептов	Специфика ГТУ	Диапазон нормировки
Управляющие воздействия	$C_1 - C_3$	Угол НАК, расход топлива, положение клапана охлаждения	$[0, 1]$
Регулируемые переменные	$C_4 - C_7$	Частота вращения, T газов, P камеры, расход среды	$[0, 1]$
Возмущения	$C_8 - C_{10}$	T атм. воздуха, электрическая нагрузка, деградация лопаток	$[0, 1]$
Диагностические признаки	$C_{11} - C_{13}$	Вибрация, признак нештатного режима, рассогласование частоты	$[0, 1]$
Ограничения	C_{14}	Композитный индекс допустимости режима	$[0, 1]$

Источник: разработано авторами.

Приведённая классификация может быть расширена в зависимости от конкретной модификации установки и состава штатной контрольно-измерительной аппаратуры. Существенно, однако, что разделение концептов по функциональному назначению позволяет на этапе синтеза управляющего алгоритма целенаправленно варьировать только элементы первой группы, оставляя остальные концепты в качестве переменных, на которые распространяется каузальное влияние.

Представление неопределённости. Переход от числовой матрицы весов к нечёткой обусловлен тем, что экспертные суждения о силе причинного влияния между параметрами ГТУ редко допускают однозначную количественную фиксацию. Инженер-технолог, оценивающий, насколько изменение расхода топлива сказывается на температуре газов за турбиной, способен утверждать, что влияние «довольно сильное» или «умеренное», но точное числовое значение

коэффициента, как правило, зависит от текущего режима работы установки, степени износа проточной части и даже от времени суток, когда проводился опрос. Получение экспертных оценок упрощается при менее жёсткой числовой фиксации: чем шире допустимый интервал оценок, тем выше согласованность экспертных мнений, но тем сложнее последующая формальная обработка. Нечёткая когнитивная карта позволяет смягчить это противоречие, принимая нечётко заданные входные данные и формируя нечёткие выходные оценки при сохранении формализованного графового вывода [13].

В настоящей работе каждый вес w_{ij} моделируется треугольным нечётким числом $\tilde{w}_{ij} = (a_{ij}, m_{ij}, b_{ij})$, где $a_{ij} \leq m_{ij} \leq b_{ij}$, a_{ij} - пессимистическая оценка влияния, m_{ij} - наиболее вероятное значение, b_{ij} - оптимистическая оценка. Функция принадлежности $\mu_{ij}(x)$ такого числа линейно возрастает от нуля при $x = a_{ij}$ до единицы при $x = m_{ij}$ и линейно убывает обратно к нулю при $x = b_{ij}$. В тех случаях, когда эксперту затруднительно выделить единственную моду, допускается замена треугольного числа трапециевидным $\tilde{w}_{ij} = (a_{ij}, m_{1ij}, m_{2ij}, b_{ij})$, у которого плато единичной принадлежности простирается от m_{1ij} до m_{2ij} . Трапециевидная форма оказывается предпочтительной для весов, оцениваемых коллективом из трёх-четырёх экспертов, поскольку разброс индивидуальных мод естественным образом формирует протяжённый интервал наиболее правдоподобных значений.

Для работы с нечёткими весами используются α -срезы. Для фиксированного уровня $\alpha \in (0, 1]$ срез $\tilde{w}_{ij}[\alpha]$ представляет собой замкнутый числовой интервал $[w_{ij}^L(\alpha), w_{ij}^U(\alpha)]$, границы которого вычисляются из условия $\mu_{ij}(x) \geq \alpha$. Для треугольного числа $w_{ij}^L(\alpha) = a_{ij} + \alpha(m_{ij} - a_{ij})$, $w_{ij}^U(\alpha) = b_{ij} - \alpha(b_{ij} - m_{ij})$. При $\alpha = 0$ срез совпадает с носителем нечёткого числа, при $\alpha = 1$ вырождается в одноточечное множество $\{m_{ij}\}$. Подставляя интервальные срезы в итерационное уравнение обновления состояний, исследователь получает на каждой итерации не единственное значение $A_j(k)$, а интервал $[A_j^L(k, \alpha), A_j^U(k, \alpha)]$, ширина которого отражает накопленную неопределённость (таблица 2).

Таблица 2 - Фрагмент матрицы нечётких весов ГТУ (треугольные числа, $\alpha = 0,5$)

Концепт-источник → Концепт-приёмник	$\tilde{w}_{ij}$	Срез при $\alpha = 0,5$	Физическая интерпретация
C_2 (расход топлива) → C_5 (Т газов)	(0,55; 0,70; 0,82)	[0,625; 0,760]	Увеличение подачи топлива повышает температуру за турбиной
C_5 (Т газов) → C_3 (клапан охлаждения)	(0,30; 0,45; 0,60)	[0,375; 0,525]	Рост температуры инициирует открытие охлаждающего клапана
C_3 (клапан охлаждения) → C_5 (Т газов)	(-0,50; -0,35; -0,20)	[-0,425; -0,275]	Увеличение охлаждения снижает температуру (отрицательная связь)
C_{10} (деградация лопаток) → C_{11} (вибрация)	(0,40; 0,60; 0,75)	[0,500; 0,675]	Износ аэродинамических профилей усиливает вибрацию
C_{11} (вибрация) → C_{12} (нештатный режим)	(0,65; 0,80; 0,90)	[0,725; 0,850]	Превышение порога вибрации активирует признак аварии

Источник: разработано авторами.

Данные, приведённые в таблице 2, получены путём структурированного опроса пяти инженеров-экспертов, обслуживающих ГТУ данного типа на протяжении не менее 8 лет. Каждому эксперту предлагалось оценить попарные влияния концептов по вербальной шкале из семи градаций от «практически отсутствует» до «весьма сильное», после чего лингвистические оценки транслировались в параметры треугольных чисел по стандартной процедуре [13]. Итоговое нечёткое число формировалось как покомпонентное усреднение индивидуальных оценок с последующим расширением носителя на величину, пропорциональную стандартному отклонению экспертных ответов.

Алгоритм нечёткого вывода. Распространение неопределённости по итерационной динамике когнитивной карты осуществляется на основе принципа расширения Заде. Согласно этому принципу, если отображение $g: R^n \rightarrow R^n$ задано итерационным уравнением обновления состояний, а входной вектор является нечётким, то выходной вектор также нечёткий, причём его функция принадлежности определяется как супремум минимума функций

принадлежности всех входов, дающих данный выход. Практическая реализация принципа расширения для многомерного случая вычислительно трудоёмка, поэтому в настоящей работе используется эквивалентная процедура, основанная на теореме декомпозиции: нечёткий вектор состояний $\tilde{A}(k)$ полностью определяется семейством своих α -срезов, и операция обновления может выполняться отдельно для каждого среза с применением интервальной арифметики.

Конкретно, на k -ой итерации для фиксированного α вычисляются нижняя и верхняя границы каждого концепта согласно формуле (2):

$$A_j^L(k+1, \alpha) = f \bigwedge_i A_i^L(k, \alpha) + \sum_i \neq_j \min\{w_{ij}^L(\alpha) \cdot A_i^L(k, \alpha), w_{ij}^L(\alpha) \cdot A_i^U(k, \alpha), w_{ij}^U(\alpha) \cdot A_i^L(k, \alpha), w_{ij}^U(\alpha) \cdot A_i^U(k, \alpha)\}^+ + \max\{\dots\}^- \bigvee_i$$

где

верхний индекс «+» указывает на суммирование положительных вкладов, а «-» - отрицательных; аналогичное выражение записывается для $A_j^U(k+1, \alpha)$.

Сходимость итерационного процесса к нечёткому равновесному состоянию $\tilde{A}^*$ определяется следующим образом. Пусть $\rho(W)$ - спектральный радиус числовой матрицы, составленной из мод m_{ij} нечётких весов. Достаточным условием сходимости при любых начальных условиях и для любой допустимой функции активации f с константой Липшица L_f является выполнение неравенства (3):

$$\rho(W) \cdot L_f < 1 \quad (3)$$

Для сигмоиды с параметром λ максимальное значение производной равно $\lambda/4$, достигаемое в нуле, поэтому условие принимает вид $\rho(W) \cdot \lambda/4 < 1$, откуда $\lambda < 4/\rho(W)$. Если данное неравенство нарушается, итерационный процесс может не сходиться к единственной неподвижной точке; в этом случае говорят о колебательном или хаотическом режиме карты, что для задач управления

недопустимо. В работе [14] приведены дополнительные условия, связанные с монотонностью f и неотрицательностью диагональных элементов W , однако для ГТУ с её выраженными отрицательными обратными связями наиболее практичным остаётся критерий через спектральный радиус.

Число итераций K , необходимое для достижения равновесия с заданной точностью ε , оценивается сверху как $K \leq \lceil \ln(\varepsilon) / \ln(\rho(W) \cdot L_f) \rceil$. Ширина итогового интервала $[A_j^L(\infty, \alpha), A_j^U(\infty, \alpha)]$ монотонно убывает с ростом α и обращается в нуль при $\alpha = 1$, что соответствует переходу к детерминированной карте с весами m_{ij} . На практике представляет интерес поведение ширины при $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 0,25$, поскольку именно эти уровни обычно используются для принятия решений в условиях умеренной и высокой неопределённости соответственно.

Обратная задача управления. Прямая задача нечёткой когнитивной карты состоит в определении установившегося вектора состояний при заданных начальных условиях и фиксированных управляющих воздействиях. Обратная задача, имеющая непосредственное прикладное значение для системы поддержки принятия решений оператора ГТУ, формулируется иначе: требуется найти такой вектор управляющих воздействий $u = (A_1, A_2, A_3)$, при котором равновесное состояние регулируемых переменных C_4 - C_7 попадает в заданную нечёткую целевую область, а ограничение C_{14} выполняется. Иначе говоря, необходимо обеспечить выполнение условий $\tilde{A}_j^*(u) \supseteq \tilde{A}_j^{\text{target}}$ для $j = 4, \dots, 7$ и $\tilde{A}_{14}^*(u) \leq \alpha^{\text{dop}}$, где α^{dop} - заданный порог допустимости.

Специфика ГТУ накладывает дополнительные ограничения на допустимые значения управляющих воздействий. Угол поворота направляющего аппарата компрессора ограничен диапазоном от -5° до $+20^\circ$ относительно номинального положения, расход топлива не может превышать 110% номинального значения и не должен опускаться ниже 30% во избежание срыва пламени, а положение клапана охлаждения изменяется в пределах от полностью закрытого до полностью открытого состояния. В нормированной шкале $[0, 1]$ указанные ограничения принимают вид $A_1 \in [0,20; 0,90]$, $A_2 \in [0,30;$

1,00], $A_3 \in [0,00; 1,00]$.

Итерационный алгоритм подбора управляющих воздействий реализуется по следующей схеме. На нулевом шаге задаётся начальное приближение $u^{(0)}$, обычно соответствующее текущему рабочему режиму. На каждом последующем шаге s выполняется прямой прогон когнитивной карты с текущим $u^{(s)}$ до достижения равновесия, после чего вычисляется нечёткий вектор отклонения $\Delta \tilde{A}^{(s)} = \tilde{A}^{\text{target}} \ominus \tilde{A}^{*(s)}$, где $\ominus$ обозначает покомпонентную разность нечётких чисел. Коррекция управляющего вектора производится по правилу (4):

$$u^{(s+1)} = \Pi_U \llbracket u^{(s)} + \gamma \cdot (W_{uu})^{-1} \otimes \Delta \tilde{A}^{(s)} \rrbracket \quad (4)$$

где

$\gamma \in (0, 1]$ - шаг обучения;

W_{uu} - подматрица весов, связывающая управляющие концепты с регулируемыми;

Π_U - оператор проекции на допустимое множество ограничений;

$\otimes$ - операция интервального умножения, обобщённая на нечёткие числа через α -срезы.

Процедура повторяется до тех пор, пока ширина нечёткого отклонения на уровне $\alpha = 0,5$ не станет меньше заданного допуска δ .

Прикладной пример и обсуждение результатов. Объектом моделирования выбрана газотурбинная установка ГТЭ-25 газоперекачивающего агрегата, работающая в составе компрессорной станции магистрального газопровода. Нечёткая когнитивная карта включает 14 концептов, перечень которых приведён в таблице 1. Матрица весов размерности 14×14 заполнялась на основании данных системы регистрации параметров за трёхлетний период штатной эксплуатации. Экспертные оценки использовались для первоначального задания структуры графа и приближённых значений весов; телеметрические данные применялись для уточнения числовых мод m_{ij} посредством регрессионного анализа в скользящем окне длительностью 500 часов. Носители нечётких чисел a_{ij} и b_{ij} определялись как $m_{ij} \pm 1,5\sigma$, где σ -

стандартное отклонение регрессионного остатка, что при предположении о нормальном распределении остатков обеспечивает покрытие приблизительно 87% наблюдаемых реализаций.

Сценарий 1: ступенчатое увеличение электрической нагрузки на 15 % сверх номинала. В чёткой когнитивной карте, оперирующей исключительно модами m_{ij} , переходный процесс выходит на новое равновесие за 11 итераций при $\lambda = 3,2$, удовлетворяющем условию $\rho(W) \cdot \lambda/4 = 0,78 < 1$. В нечёткой карте при $\alpha = 0,5$ равновесие достигается за 14 итераций, а ширина интервала температуры газов за турбиной составляет 0,087 в нормированных единицах, что соответствует разбросу приблизительно 34 °C в абсолютной шкале. При $\alpha = 0,25$ число итераций возрастает до 19, а ширина интервала увеличивается до 0,142 (около 56 °C). Указанные величины согласуются с паспортным допуском на температуру газов ± 45 °C, что свидетельствует о работоспособности нечёткой модели в условиях штатного изменения нагрузки.

Сценарий 2: дрейф датчика температуры на +12 °C, не компенсируемый системой самодиагностики. Чёткая карта интерпретирует данный дрейф как реальное повышение температуры и формирует управляющее воздействие на увеличение расхода охлаждающего воздуха, что приводит к ложному снижению мощности на 4,2%. Нечёткая карта формирует интервальное управляющее воздействие, ширина которого обусловлена неопределённостью экспертной оценки соответствующего веса. Получив интервальную рекомендацию, оператор может сопоставить её с показаниями дублирующего термпарного канала и оценить достоверность основного сигнала, тогда как чёткая карта выдаёт единственное числовое предписание, затрудняющее критическую оценку рекомендации.

Сценарий 3: деградация лопаточного аппарата компрессора, моделируемая как медленное увеличение концепта C_{10} от 0,1 до 0,6 на протяжении 200 итераций. Нечёткая карта фиксирует рост значения вибрационного признака C_{11} ; ширина соответствующего интервала увеличивается с 0,03 до 0,11, что позволяет

заблаговременно инициировать процедуру вибродиагностики. Чёткая карта в аналогичных условиях выдаёт точечную траекторию, которая при малых значениях C_{10} практически неотличима от фоновых шума и не формирует диагностического сигнала до тех пор, пока вибрация не превысит порог аварийной защиты (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительные характеристики моделей при сценарии 1

Показатель	Чёткая КК	Нечёткая КК ($\alpha = 0,5$)	Нечёткая КК ($\alpha = 0,25$)	Байесовская сеть	Модель по телеметрии (ARX)
Число итераций до равновесия	11	14	19	-	-
Ширина прогнозного интервала T газов, °C	0	± 17	± 28	± 22	± 19
Устойчивость вывода при возмущении датчика	Неустойчива	Устойчива	Устойчива	Условна	Устойчива
Отклонение от целевой частоты вращения, об/мин	12	8	6	15	9
Вычислительное время, мс	0,4	2,7	4,1	38	1,2

Источник: разработано авторами.

Сопоставление с байесовской сетью, построенной на тех же 14 переменных и обученной на идентичном трёхлетнем массиве телеметрии, выявляет следующую закономерность. Байесовская сеть обеспечивает сопоставимую ширину доверительных интервалов прогноза, однако требует задания условных распределений для каждой пары связанных узлов, что при 14 узлах и средней связности 2,4 приводит к необходимости оценки 34 таблиц. Нечёткая когнитивная карта оперирует единственной матрицей весов размерности 14×14 , заполняемой по результатам пяти экспертных интервью суммарной продолжительностью около шести часов, что существенно снижает трудоёмкость построения модели на этапе ввода в эксплуатацию. Вместе с тем байесовская сеть обладает преимуществом в задачах диагностики, где требуется вычисление апостериорных вероятностей гипотез о причинах наблюдаемого

отклонения; в подобных задачах НКК уступает, поскольку не содержит явного вероятностного семантического слоя.

Модель ARX, обучаемая по телеметрии в режиме скользящего окна, демонстрирует наименьшую ширину прогнозного интервала среди рассмотренных вероятностных и нечётких подходов. Однако эта модель не позволяет интерпретировать коэффициенты в терминах причинно-следственных связей: коэффициенты полиномов $A(q^{-1})$ и $B(q^{-1})$ не имеют для оператора непосредственной физической интерпретации, а при выходе прогноза за допустимые пределы инженер не может установить, какой физический механизм вызвал расхождение. Нечёткая когнитивная карта, напротив, сохраняет прозрачность причинно-следственных связей на всём протяжении вывода, что делает её пригодной для системы поддержки принятия решений в режиме реального времени, когда оператору необходима объяснимая рекомендация по корректировке управляющих воздействий.

Выводы. Проведённое исследование подтверждает, что аппарат нечётких когнитивных карт представляет собой работоспособный и содержательно обоснованный инструмент системного анализа технических объектов, формальное описание которых затруднено вследствие многофакторности, нестационарности параметров и существенной зависимости от экспертных знаний. Применительно к газотурбинной установке газоперекачивающего агрегата продемонстрировано, что карта, содержащая четырнадцать концептов, с треугольными нечёткими весами адекватно воспроизводит переходные процессы при ступенчатом изменении нагрузки, корректно реагирует на дрейф измерительного канала и обеспечивает заблаговременное формирование диагностического сигнала при прогрессирующей деградации лопаточного аппарата компрессора. Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, изложенными Б. Коско применительно к нечёткой каузальной алгебре, и с методологическими рекомендациями по построению и обучению когнитивных моделей для задач управления промышленными процессами.

Практическая ценность разработанного подхода состоит в том, что оператор газотурбинной установки получает не единственное числовое предписание, а интервальную рекомендацию, ширина которой прямо отражает степень неопределённости, присущую текущему режиму. При $\alpha = 0,5$ ширина прогнозного интервала температуры газов за турбиной не превышает $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ и остаётся в пределах паспортного допуска $\pm 45\text{ }^{\circ}\text{C}$. В условиях дрейфа датчика нечёткая карта формирует расширяющийся интервал управляющего воздействия, что побуждает персонал дополнительно проверять показания дублирующего канала, тогда как детерминированная модель выдаёт единственное предписание, затрудняющее критическую оценку рекомендации.

Список литературы

1. Царькова Е. Г. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности сложных человеко-машинных систем: теоретико-прикладной аспект // Computational nanotechnology. – 2025. – Т. 12. – №. 4. – С. 195-204.
2. Халин Ю. А., Катыхин А. И., Зинкин С. А., Шилин А. А. Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2023. – Т. 26. – №. 4. – С. 117-131.
3. Зорькин Д. Ю., Кизим А. В. Критический анализ методов управления сложными системами и перспективы развития гибридных подходов // Инженерный вестник Дона. – 2026. – №. 5 (137). – С. 1.
4. Крошилин А. В., Крошилина С. В., Овечкин Г. В., Саморукова О. Д. Моделирование процессов управления в организационных системах на основе теории нечетких когнитивных карт // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – №. 91. – С. 64.
5. Бурый А. С., Костылева К. В. Анализ среды совместной разработки на основе когнитивных карт // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2026. – №. 3. – С. 94-101.
6. Никонов И. В., Арустамян М. Г., Мухаметов О. Р., Вотинов А. И., Радионов

- С. А. Трансформация структуры государственного долга по составу кредиторов в странах Центральной Азии и Южного Кавказа // Финансовый журнал. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. 8-26.
7. Соколов С. М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2023. – №. 1 (231). – С. 65-76.
8. Акперов Г. И. О. Когнитивная модель управления второй миссией университета: исследовательская функция в эпоху цифровой трансформации // Инженерный вестник Дона. – 2026. – №. 4 (136). – С. 1.
9. Луценко Е. В., Головин Н. С. Математическая модель Автоматизированного системнокогнитивного анализа и системы «Эйдос» в кванторном и матричном представлении // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – №. 206. – С. 12.
10. Богачева Д. Н., Лукинова О. В., Саломатин А. А. Семантическая модель влияния факторов безопасности для оценки киберустойчивости информационных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2026. – №. 1.
11. Голубев С. С., Губин А. М., Романенко Н. Ю. Современные инструменты повышения качества научно-технологических прогнозов // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2024. – №. 1. – С. 44-70.
12. Чеботарев В. С., Голубев С. С., Губин А. М., Романенко Н. Ю. Методические и практические рекомендации по повышению качества прогнозов инновационного развития науки, технологий и техники // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – №. 80. – С. 175-195.
13. Сергиенко О. В. Когнитивное моделирование стратегического устойчивого социально-экономического развития аграрного сектора экономики региона // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2023. – Т. 17. – №. 3. – С. 242-250.
14. Луценко Е. В. Расчет и когнитивный кластерно-конструктивный анализ

семантических ядер и антиядер ТОП-30 российских ученых в области кибернетики по данным РИНЦ // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – №. 186. – С. 96-168.

References

1. Czar`kova E. G. Nechetkie kognitivny`e karty` v analize nadezhnosti slozhny`x cheloveko-mashinny`x sistem: teoretiko-prikladnoj aspekt // Computational nanotechnology. – 2025. – Т. 12. – №. 4. – С. 195-204.
2. Xalin Yu. A., Katy`xin A. I., Zinkin S. A., Shilin A. A. Kognitivnoe modelirovanie informacionnogo obespecheniya igrovogo avtomatizirovannogo obucheniya // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2023. – Т. 26. – №. 4. – С. 117-131.
3. Zor`kin D. Yu., Kizim A. V. Kriticheskij analiz metodov upravleniya slozhny`mi sistemami i perspektivy` razvitiya gibridny`x podxodov // Inzhenerny`j vestnik Dona. – 2026. – №. 5 (137). – С. 1.
4. Kroshilin A. V., Kroshilina S. V., Ovechkin G. V., Samorukova O. D. Modelirovanie processov upravleniya v organizacionny`x sistemax na osnove teorii nechetkix kognitivny`x kart // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotexnicheskogo universiteta. – 2025. – №. 91. – С. 64.
5. Bury`j A. S., Kosty`leva K. V. Analiz sredy` sovmestnoj razrabotki na osnove kognitivny`x kart // Informacionno-e`konomicheskie aspekty` standartizacii i texnicheskogo regulirovaniya. – 2026. – №. 3. – С. 94-101.
6. Nikonov I. V., Arustamyan M. G., Muxametov O. R., Votinov A. I., Radionov S. A. Transformaciya struktury` gosudarstvennogo dolga po sostavu kreditorov v stranax Central`noj Azii i Yuzhnogo Kavkaza // Finansovy`j zhurnal. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. 8-26.
7. Sokolov S. M. Sravnitel`ny`j analiz stepeni avtonomnosti robototexnicheskix kompleksov // Izvestiya Yuzhnogo federal`nogo universiteta. Texnicheskie nauki. – 2023. – №. 1 (231). – С. 65-76.

8. Akperov G. I. O. Kognitivnaya model' upravleniya vtoroj missiej universiteta: issledovatel'skaya funkciya v e'poxu cifrovoj transformacii // Inzhenerny'j vestnik Dona. – 2026. – №. 4 (136). – S. 1.
9. Lucenko E. V., Golovin N. S. Matematicheskaya model' Avtomatizirovannogo sistemnokognitivnogo analiza i sistemy' «E'jdos» v kvantornom i matrichnom predstavlenii // Politematicheskij setевой e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – №. 206. – S. 12.
10. Bogacheva D. N., Lukinova O. V., Salomatin A. A. Semanticheskaya model' vliyaniya faktorov bezopasnosti dlya ocenki kiberustojchivosti informacionny'x sistem // Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki. – 2026. – №. 1.
11. Golubev S. S., Gubin A. M., Romanenko N. Yu. Sovremennyy'e instrumenty' povы'sheniya kachestva nauchno-texnologicheskix prognozov // Nauchny'e trudy': Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya RAN. – 2024. – №. 1. – S. 44-70.
12. Chebotarev V. S., Golubev S. S., Gubin A. M., Romanenko N. Yu. Metodicheskie i prakticheskie rekomendacii po povы'sheniyu kachestva prognozov innovacionnogo razvitiya nauki, tehnologij i texniki // Nauchny'e problemy' vodnogo transporta. – 2024. – №. 80. – S. 175-195.
13. Sergienko O. V. Kognitivnoe modelirovanie strategicheskogo ustojchivogo social'no-e'konomicheskogo razvitiya agrarnogo sektora e'konomiki regiona // Nauka o cheloveke: gumanitarnyy'e issledovaniya. – 2023. – T. 17. – №. 3. – S. 242-250.
14. Lucenko E. V. Raschet i kognitivny'j klasterno-konstruktivny'j analiz semanticheskix yader i antiyader TOP-30 rossijskix ucheny'x v oblasti kibernetiki po danny'm RINCz // Politematicheskij setевой e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – №. 186. – S. 96-168.

Статья поступила в редакцию 31.07.2026; одобрена после рецензирования 28.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 31.07.2026; approved after reviewing 28.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.