

## Применение методов искусственного интеллекта и когнитивных технологий в задачах моделирования динамических систем

О. В. Дружинина<sup>1</sup>, О. Н. Масина<sup>2\*</sup>, Е. В. Игонина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44-2

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина», г. Елец, Российская Федерация

Адрес: 399770, Российская Федерация, Липецкая область, г. Елец, ул. Коммунаров, д. 28-1

\* olga121@inbox.ru

### Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с применением методов искусственного интеллекта и когнитивных технологий в задачах моделирования управляемых динамических систем. Представлен обзор результатов решения некоторых задач когнитивного моделирования. Изучены аспекты построения и исследования когнитивных моделей с применением различных инструментов искусственного интеллекта. Охарактеризованы особенности применения нейронных сетей, эволюционных алгоритмов, объектно-ориентированных языков программирования, многоагентных архитектур в задачах когнитивного моделирования. Дано описание областей применения искусственного интеллекта и когнитивных технологий в задачах моделирования динамических систем. Рассмотрено методическое обеспечение для исследования траекторной динамики систем интеллектуального управления. Предложен подход к построению динамических когнитивных карт для моделирования маятниковых систем с применением интеллектуальных технологий. Разработан обобщенный алгоритм стабилизации маятника с применением нечетких когнитивных карт. Рассмотренный подход позволяет синтезировать модели перевернутого маятника с учетом различных физических эффектов и решать ряд задач управления маятниковыми системами. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и совершенствовании управляемых технических систем.

**Ключевые слова:** когнитивное моделирование, интеллектуальный анализ, динамические системы, когнитивная карта, модель перевернутого маятника с интеллектуальным управлением, стабилизация

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Для цитирования:** Дружинина О. В., Масина О. Н., Игонина Е. В. Применение методов искусственного интеллекта и когнитивных технологий в задачах моделирования динамических систем // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 1. С. 83-97. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.83-97>

© Дружинина О. В., Масина О. Н., Игонина Е. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## Application of Artificial Intelligence Methods and Cognitive Technologies in Dynamic Systems Modeling Problems

O. V. Druzhinina<sup>a</sup>, O. N. Masina<sup>b\*</sup>, E. V. Igonina<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Address: 44 Vavilov St., building 2, Moscow 119333, Russian Federation

<sup>b</sup> Bunin Yelets State University, Yelets, Russian Federation

Address: 28-1 Kommunarov St., Yelets 399770, Lipetsk region, Russian Federation

\* olga121@inbox.ru

### Abstract

The issues related to the use of artificial intelligence methods and cognitive technologies in the modeling of controlled dynamic systems are considered. An overview of the results of solving some cognitive modeling problems is presented. Aspects of the construction and research of cognitive models using various artificial intelligence tools are studied. The features of the application of neural networks, evolutionary algorithms, object-oriented programming languages, multi-agent architectures in cognitive modeling problems are characterized. The description of application fields for artificial intelligence and cognitive technologies in the problems of modeling dynamic systems is given. Methodological support for the study of the trajectory dynamics of intelligent control systems is considered. An approach to the design of dynamic cognitive maps for modeling pendulum systems using intelligent technologies is proposed. A generalized algorithm for stabilization of the pendulum using fuzzy cognitive maps is developed. The considered approach makes it possible to synthesize models of an inverted pendulum taking into account various physical effects and solve a number of problems of controlling pendulum systems. The obtained results can be used in the design and improvement of controlled technical systems.

**Keywords:** cognitive modeling, intelligent analysis, dynamic systems, cognitive map, inverted pendulum model with intelligent control, stabilization

*The authors declare no conflict of interest.*

**For citation:** Druzhinina O.V., Masina O.N., Igonina E.V. Application of Artificial Intelligence Methods and Cognitive Technologies in Dynamic Systems Modeling Problems. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022; 18(1):83-97. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.83-97>



## Введение

В настоящее время для моделирования динамических систем и процессов разработан ряд качественных и численных методов, при этом выбор метода определяется степенью информативности о поведении системы и степенью ее сложности. В случае неопределенностей, связанных с особенностями взаимодействия элементов системы и с внешними возмущениями, часто используют подход, основанный на построении и анализе когнитивных моделей [1-3].

Когнитивные модели находят применение при разработке систем поддержки принятия решений, экспертных систем, информационных систем с интеллектуальным анализом данных, при описании слабо формализуемых процессов в естествознании и технике, а также при моделировании социально-экономических систем [4; 5]. Когнитивное моделирование включает в себя этапы построения содержательных, концептуальных и формальных моделей (рис. 1). Содержательные модели основаны на представлении с помощью естественного языка, а концептуальные – на представлении с использованием понятий предметных областей знания, связанных с изучением объекта моделирования. Формальные модели позволяют описать концептуальные модели с помощью инструментов математического моделирования и алгоритмических языков. Создание моделей на каждом из этапов сопряжено с пополнением знаний о рассматриваемом объекте, что может приводить к уточнению концепций и к пересмотру описания содержательных, концептуальных и формальных моделей.



Р и с. 1. Взаимосвязь уровней моделирования систем  
F i g. 1. System Modeling Levels Interrelation

Формализация может выполняться в направлении построения таких нечетких, нейросетевых и нейро-нечетких моделей, которые могут быть использованы при разработке и исследовании моделей сложных управляемых динамических систем<sup>1</sup> [6; 7]. Когнитивные технологии связаны с развитием новых методов исследования, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем с помощью учета в этих моделях и методах когнитивных возможностей (восприятия, представ-

ления, познания, понимания, объяснения) и методов искусственного интеллекта. Получение достоверной информации и ее оперативный анализ, а также разработка и реализация интеллектуальных алгоритмов в сочетании с эффективными методами параметрической оптимизации являются важнейшими аспектами когнитивного моделирования сложных управляемых систем.

Впервые когнитивный подход к моделированию систем и принятию решения субъектом управления был предложен американским исследователем Р. Аксельродом в 1976 г., а термин «когнитивное моделирование» был введен психологом Э. Толменом еще в 1948 г. Отметим, что формирование когнитивного анализа на первых этапах осуществлялось в рамках такого направления социальной психологии, как когнитивизм, основной задачей которого является изучение процессов восприятия и познания. На идеях когнитивизма базируется когнитология, которая связана с анализом управленческих проблем и проблем принятия решений.

Отметим, что в рамках когнитивного подхода к моделированию существенное внимание уделяется анализу таких процессов, как представление, обработка, интерпретация и получение новых знаний. Перечислим некоторые направления, связанные с когнитивным моделированием:

- развитие методов понимания естественных языков в программных средах;
- современные проблемы компьютеризации и цифровизации;
- развитие методов искусственного интеллекта и приложения этих методов к практическим задачам;
- реализация компьютерной парадигмы: символьные представления информации и их обработка с помощью алгоритмических логико-комбинаторных процедур.

Одной из задач, анализируемой в рамках когнитивного моделирования, является изучение моделей мыслительных процессов и понятийной системы человека. В указанном направлении можно использовать создание упрощенных модельных задач, а также возможность применения анализа «упрощенных моделей» в интеллектуальных технологиях<sup>2</sup> [8].

Когнитивное моделирование предполагает построение когнитивных карт [9-11], которые представляют собой причинно-следственные диаграммы специальной структуры. Как известно, когнитивная карта характеризует структуру системы с помощью отображения взаимосвязи между элементами этой системы. Средством представления когнитивных карт являются знаковые ориентированные графы. Вершины графов отвечают концептам (параметрам и переменным системы, внутренним и внешним факторам), при этом ребра графов определяют причинно-следственные отношения между концептами. Построение соответствующих матриц смежности позволяет оценить степень значимости концепта и проанализировать данные о причинно-следственных связях (прямых и косвенных). Одним из видов когнитивных карт являются нечеткие когнитивные карты, первоначально рассмотренные Б. Коско в 1986 г. В нечетких когнитивных картах отслежива-

<sup>1</sup> Игонина Е. В., Масина О. Н., Дружинина О. В. Анализ устойчивости динамических систем на основе методов интеллектуального управления и свойств линейных матричных неравенств. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2020. 174 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42819544> (дата обращения: 14.12.2021).

<sup>2</sup> Финн В. К. Интеллект, информационное общество, гуманитарное знание и образование. М.: URSS, 2021. 464 с.



ется динамика состояний концептов с учетом весовых коэффициентов, характеризующих причинно-следственные связи. К примеру, в [11] продемонстрирована целесообразность использования нечетких когнитивных карт для анализа слабо формализуемых систем, которая обусловлена их потенциальными возможностями и особенностями самих моделируемых систем. В [12] описано применение технологии когнитивного моделирования к исследованию образовательных систем с учетом различных сценариев взаимодействия с обществом. Отметим, что в настоящее время когнитивные системы востребованы на разных уровнях образовательного процесса. В [13] рассмотрено использование методов искусственного интеллекта и когнитивных технологий в процессе 3D-прототипирования технических объектов, а также изучены аспекты разработки автоматизированных интеллектуальных систем обучения. В [14] рассмотрены вопросы анализа и синтеза когнитивных структур при моделировании содержания областей знаний, в частности, охарактеризовано понятие когнитивной цели, связанное с формализацией объектов из различных областей профессиональной деятельности, предложена классификация когнитивных целей.

В настоящей статье изучены вопросы применения методов искусственного интеллекта и когнитивных технологий в задачах моделирования динамических систем. Представлен обзор результатов, связанных с разработкой методов и с решением конкретных задач когнитивного моделирования. Рассмотрены аспекты создания и исследования когнитивных моделей с применением различных инструментов искусственного интеллекта. В частности, охарактеризованы особенности применения в задачах когнитивного моделирования нейронных сетей, эволюционных алгоритмов, объектно-ориентированных языков программирования, многоагентных архитектур. Дано описание областей применения искусственного интеллекта и когнитивных технологий в задачах моделирования динамических систем. Представлена основа методического обеспечения для исследования устойчивости динамических систем интеллектуального управления. Также предлагается подход к построению таких динамических когнитивных карт, которые соответствуют формализованному описанию маятниковых систем нечеткими правилами моделей Такаги-Сугено. Предлагаемые когнитивные карты учитывают управляющие воздействия, формируемые интеллектуальными регуляторами и направленные на обеспечение устойчивости маятника по отношению к внешним возмущениям.

### Когнитивные технологии и искусственный интеллект в моделировании динамических систем

При моделировании ряда классов динамических систем актуальным направлением является разработка методов искусственного интеллекта<sup>3</sup>. Отметим, что конвергенция методов искусственного интеллекта и методов теории управления [15-17] часто приводит к эффективным результатам. С учетом уровня развития сквозных цифровых технологий отечествен-

ными исследователями выделяются в качестве основных позиций искусственный интеллект, технологии управления интеллектуальными устройствами, суперкомпьютерные и аддитивные технологии. Создание технологий сопровождается построением и анализом адекватных математических моделей, которые обеспечивают теоретические исследования изучаемого объекта. Разработанные на основе методов искусственного интеллекта и когнитивных технологий программно-аппаратные средства создают гибкую среду для моделирования. На рис. 2 приведены инструменты искусственного интеллекта, используемые при когнитивном моделировании. К ним относятся нейронные сети, эволюционные алгоритмы, продуцирование знаний, объектно-ориентированные языки программирования, логические модели искусственного интеллекта, объектно-логические модели искусственного интеллекта, многоагентные архитектуры.



Р и с. 2. Инструменты искусственного интеллекта

F i g. 2. Artificial Intelligence Tools

Некоторые преимущества инструментов искусственного интеллекта, перечисленных на рис. 2, состоят в следующем. Для нейронных сетей характерны: применимость в многофакторных проблемах с недостаточной формализуемостью структур, высокий уровень параллелизма и скорости, возможность обучения. Эволюционные алгоритмы характеризуются высоким уровнем параллелизма и скорости, продуцированию знаний свойственны способность к представлению описательно-конструктивных знаний и к пересмотру, а также естественность правил «если ..., то». Хорошая структуризация и высокая скорость характерны объектно-ориентированным языкам программирования (семантические цепи, фреймы и т.д.). Логические модели обладают высокой мощностью представления, корректностью и высокой сложностью автономных задач.

<sup>3</sup> Сотник С. Л. Проектирование систем искусственного интеллекта. 2-е изд. М.: ИНТУИТ, 2016. 228 с.; Осипов Г. С. Методы искусственного интеллекта. М.: Физматлит, 2011. 296 с.



Объектно-логические модели искусственного интеллекта сочетают в себе преимущества объектно-ориентированных и логических моделей. Многоагентные архитектуры допускают самоорганизацию и пересмотр.

Несмотря на широкий спектр возможностей, инструментам искусственного интеллекта свойственны и некоторые недостатки. Так, для построения когнитивной модели объекта на основе нейронных сетей требуется информация для обучения: репрезентативный набор примеров «вход–выход», выполнение многоциклового настройки внутренних элементов и связей между ними. Эволюционным алгоритмам свойственно большое количество настраиваемых параметров, что оказывает влияние на эффективность реализации указанных алгоритмов. К недостаткам систем продуцирования знаний относят сложность в реализации больших баз знаний, недостаточную структуризацию и трудности проверки корректности построенной модели. Основным недостатком объектно-ориентированного программирования является некоторое снижение быстродействия по причине сложной организации программного кода. Для логических моделей характерны автономность традиционных приложений, недостаточная совместимость с эвристикой, неразрешимость «богатой» логики и недостаточность «единичной» логики. Объектно-логические модели сочетают в себе недостатки логических моделей и объектно-ориентированного программирования. Многоагентная архитектура предполагает ситуационную оценку агентных активностей, при этом ряд проблем может возникнуть при агентном обучении и при необходимости учета большого количества вариантов поведения.

При разработке интеллектуальных пакетов прикладных программ необходимо учитывать особенности инструментов искусственного интеллекта. Важно отметить<sup>4</sup>, что разработка интеллектуальных пакетов прикладных программ привела к возникновению такого междисциплинарного направления, как компьютерное когнитивное моделирование, связанное с созданием самообучающихся программ. Самообучающиеся программы используются, в частности, в задачах моделирования робототехнических систем.

В настоящее время искусственный интеллект и когнитивные технологии связаны с такими направлениями, как:

- интеллектуальное управление;
- интеллектуальное управление;
- когнитивное моделирование;
- управление сетью;
- основанное на моделях прогнозирующее управление;
- модели, основанные на знаниях;
- сбор и анализ данных;
- когнитивные вычисления;
- многоагентные архитектуры;
- технологии когнитивного правительства.

Алгоритмы управления, идентификации и моделирования должны опираться на знания, созданные и обновляемые на основе процесса анализа данных в форме выявленных закономерностей. Алгоритмизация перехода от наблюдения к прогнозированию должна осуществляться в направлениях, указанных на рис. 3.

<sup>4</sup> Там же.



Р и с. 3. Алгоритмизация перехода от наблюдения к прогнозированию  
Fig. 3. Algorithmization of the transition from observation to prediction

Когнитивные технологии особенно актуальны при решении таких задач, решение которых требует учитывать особенности целенаправленного поведения и сложности управления объектами в постоянно меняющихся условиях. Указанные задачи могут возникать при разработке интеллектуальных образовательных систем, при совершенствовании веб-систем третьего и четвертого поколений, при создании интеллектуальных модулей технических систем, а также при проектировании автономных объектов различного назначения. Привлечение искусственного интеллекта на базе когнитивных технологий позволяет организовать более эффективно работу с массивами неструктурированной информации (см. рис. 4). Когнитивные вычисления, с одной стороны, имеют частичную аналогию с особенностями функционирования человеческого мозга, а с другой стороны, применяют методологию глубокого машинного обучения и позволяют разрабатывать новые правила и алгоритмы работы с данными в процессе проведения вычислений.



Р и с. 4. Облачные технологии и когнитивные вычисления в анализе больших данных

Fig. 4. Cloud technologies and cognitive computing in big data analysis



Компонентами когнитивной ИТ-инфраструктуры являются модули искусственного интеллекта; системы хранения; программное обеспечение; API (интерфейс прикладного программирования); сервисы; гибридные облачные платформы с когнитивными рабочими нагрузками. Отметим, что когнитивная ИТ-инфраструктура создается с помощью аппаратных ускорителей и новейших систем хранения данных. Когнитивные вычисления осуществляются с использованием открытых архитектур в условиях оперативного обновления. В качестве примеров перспективного использования когнитивных вычислений следует отметить интеллектуальный анализ обстановки на автодорогах, обработку огромных массивов неструктурированной информации в сейсмологии, построение когнитивных моделей и создание программных средств для анализа процесса функционирования социально-экономических систем<sup>5</sup>.

Рассмотрим применение когнитивных технологий в исследованиях динамических систем интеллектуального управления. К классу указанных систем относятся управляемые системы, основанные на знаниях и логических регуляторах, а также использующие уравнения динамики на базе обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнения динамики с учетом шумов на базе стохастических дифференциальных уравнений. Перечислим некоторые методы исследования и анализа свойств динамических систем интеллектуального управления.

1. Методы учета статистических неопределенностей и неопределенностей в смысле Заде при задании когнитивных моделей, в описании которых задействован аппарат стохастических и нечетких дифференциальных уравнений.
2. Методы исследования устойчивоподобных свойств на базе различных типов функций Ляпунова и комбинированные качественные методы.
3. Методы на основе построения моделей Такаги–Сугено и интеллектуального управления с учетом универсальной аппроксимации нелинейной динамической системы набором линейных подсистем.
4. Индексно–дивергентные методы.
5. Методы анализа импульсных моделей и моделей с запаздыванием.
6. Методы построения и анализа маятниковых интеллектуальных динамических систем.
7. Эвристические методы глобальной параметрической оптимизации.
8. Методы интеллектуального управления техническими системами с переключениями.
9. Методы нейронных сетей и эволюционного моделирования.

Описание и применение ряда методов анализа устойчивости систем интеллектуального управления рассматривается в работе<sup>6</sup>. В [18] представлено развитие методов интеллектуального управления переключаемыми системами и дано описание возможностей отечественной программно-аппаратной платформы «Эльбрус 801-РС» для решения научно-исследовательских задач, связанных с математическим моделированием нели-

нейных управляемых систем с переключениями. Достаточно высокую эффективность продемонстрировали результаты внедрения рабочих модулей программного комплекса моделирования переключаемых систем с применением архитектуры Эльбрус. Предложенное программное обеспечение направлено на решение задач нейросетевого моделирования для поиска оптимальных параметров динамических моделей с учетом высокопараллельного машинного обучения. Следует отметить, что расширение программной инфраструктуры платформы «Эльбрус 801-РС» применительно к ряду научно-исследовательских задач связано с применением когнитивного моделирования. В [19] разработаны алгоритмы с использованием искусственных нейронных сетей и логических регуляторов, позволяющие выполнить поиск оптимальных параметров движения динамических систем с переключениями. Предложенные алгоритмы могут быть использованы при когнитивном моделировании технических систем.

## Моделирование систем с помощью когнитивных карт

Когнитивная карта представляет собой модель, задаваемую с помощью графа  $G = (E, W)$ , где  $E$  представляет собой множество ситуационных факторов, а множество  $W$  задает причинно-следственные связи между ними. Элементы множества факторов ситуации определяют вершины графа  $G$ , а причинно-следственные отношения представляются ребрами графа. Методология построения когнитивных карт основана на знаниях экспертов о поведении изучаемого процесса (явления) и определяется следующими этапами.

Этап 1. Определение списка факторов, которые характеризуют процесс (систему).

Этап 2. Определение степеней влияния между каждой парой факторов или задание функций принадлежности.

Этап 3. Синтез когнитивной карты.

Этап 4. Анализ когнитивной карты и интерпретация результатов.

На начальных этапах когнитивного моделирования следует обратить внимание на необходимость корректного выбора факторов, задающих вершины графа когнитивной карты. Не вполне корректно подобранные факторы могут повлиять на результаты исследования. С использованием первоначально выбранных факторов можно построить стартовую когнитивную карту. Стартовая карта может использоваться на протяжении всего процесса моделирования, а может быть изменена в результате деятельности эксперта, с учетом того или иного этапа когнитивного моделирования.

Поскольку построение когнитивной карты осуществляется на основе экспертных знаний о предметной области, то существует риск существенного несоответствия синтезированной модели свойствам реальной системы. Это несоответствие может быть связано с субъективным характером знаний эксперта предметной области и с неточностями формализации этих знаний с помощью выбранного математического аппарата.

<sup>5</sup> Бондаренко Н. Ю., Калякина И. М. Когнитивное моделирование социально-экономических систем различного уровня. Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2021. 254 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46305527> (дата обращения: 14.12.2021).

<sup>6</sup> Дружинина О. В., Масина О. Н. Методы анализа устойчивости динамических систем интеллектуального управления. М.: URSS, 2016. 248 с.

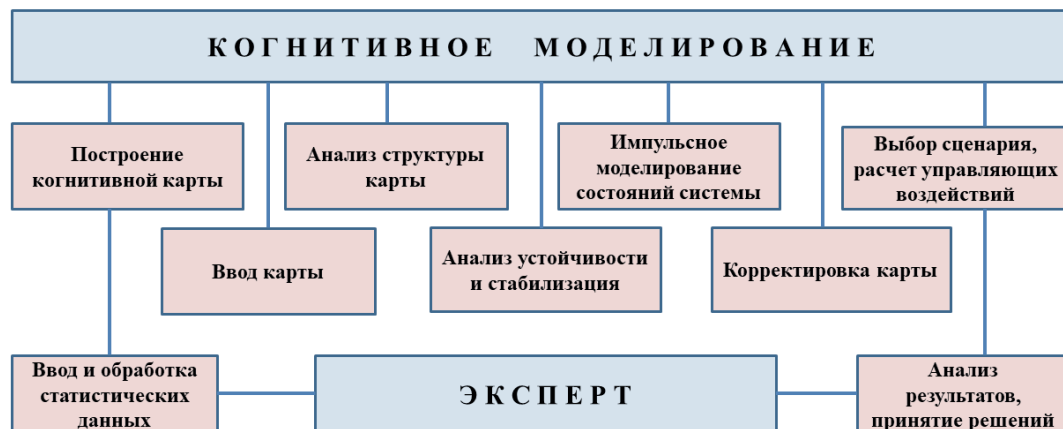


Проведение анализа достоверности и верификация когнитивной карты являются важным этапом когнитивного моделирования.

Если когнитивная карта определяет слабо формализованную модель, то в качестве вершин графа рассматриваются концепты, описывающие изучаемый процесс, тогда как ребра графа задают причинно-следственное влияние концептов и определяются конкретными действиями (командами). В формализованных когнитивных картах за вершины обозначают

переменные, а ребра представляют собой весовые влияния переменных друг на друга. В некоторых формальных моделях значения ребер могут задавать время, функции или другие формальные операции.

На рис. 5 представлен вариант динамической структурной схемы «когнитивное моделирование-эксперт», допускающий расширение (сужение) в зависимости от постановки конкретной задачи когнитивного моделирования.



Р и с. 5. Вариант динамической структурной схемы «когнитивное моделирование - эксперт»  
Fig. 5. A variant of the dynamic block diagram "cognitive modeling - expert"

В зависимости от весовых значений, которые может принимать ребро графа, когнитивные карты подразделяют на традиционные (простые) и на нечеткие когнитивные карты. К простым когнитивным картам относятся вышерассмотренные разновидности карт. Нечеткие когнитивные карты определяются нечетким ориентированным графом вида  $G = (E, W)$ , где  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_p\}$  – множество концептов,  $W = \{w_{ij}\}$  – множество связей между концептами,  $i, j = 1, \dots, p$ . Для обоснования причинно-следственных связей между концептами эксперты используют нечеткие правила вида «если ..., то» и с учетом каждой взаимосвязи определяют лингвистический вес, который с помощью процедуры дефаззификации (используется метод центраида) преобразуется в числовой вес  $w_{ij}$  в диапазоне от -1 до 1.

Различают три возможных вида причинно-следственных связей между концептами:

- 1) положительная причинно-следственная связь ( $w_{ij} > 0$ ) между концептами  $E_i$  и  $E_j$ , т.е. увеличение (уменьшение) значения  $E_i$  приводит к увеличению (уменьшению) значения  $E_j$ ;
- 2) отрицательная причинно-следственная связь ( $w_{ij} < 0$ ) между концептами  $E_i$  и  $E_j$ , т.е. увеличение (уменьшение) значения  $E_i$  приводит к уменьшению (увеличению) значения  $E_j$ ;
- 3) отсутствие связи между концептами  $E_i$  и  $E_j$  ( $w_{ij} = 0$ ).

Особенность когнитивных карт заключается в возможности решения задач моделирования на основе использования интеллектуальных технологий. В качестве недостатка некото-

рых типов нечетких когнитивных карт следует выделить зависимость от мнения эксперта. Эффективным решением этой проблемы при моделировании систем будет являться использование методов искусственного интеллекта, которые позволят более точно провести настройку причинно-следственных связей. Использование нечетких когнитивных карт связано с интеллектуальным процессом познания и прогнозирования поведения изучаемой системы.

Нечеткие когнитивные карты являются частным случаем обобщенных нечетких когнитивных карт, предложенных отечественными исследователями. Для обобщенного случая каждому концепту множества  $E_i$  соответствует терм-множество лингвистической переменной  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_j}^i\}$ , где  $m_j$  – число типовых состояний концепта,  $i, j = 1, \dots, p$ . Для задания термина  $T_k^i$  синтезируется терм-множество с функцией принадлежности  $\mu_{T_k^i}(x)$ <sup>7</sup>. Нечеткие переменные отвечают связям между состояниями каждой пары концептов. Специфика обобщенных нечетких когнитивных карт определяется: а) выбранной формой функций принадлежности (треугольная, трапециевидная, гауссова и др.); б) способом нечеткого логического вывода (в смысле Мамдани, Цукамото, Ларсена); в) определением процедуры дефаззификации. На рис. 6 представлены некоторые типы нечетких когнитивных карт, изученные в [9-11], [20-26] и в других работах.

<sup>7</sup> Игонина Е. В., Масина О. Н., Дружинина О. В. Анализ устойчивости динамических систем на основе методов интеллектуального управления и свойств линейных матричных неравенств. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2020. 174 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42819544> (дата обращения: 14.12.2021).



- когнитивные карты Б. Коско и их разновидности
- когнитивные карты В. Силова
- продукционные когнитивные карты
- обобщенные продукционные когнитивные карты
- реляционные когнитивные карты
- «совместимые» когнитивные карты
- когнитивно-игровые карты когнитивные карты
- нейро-нечеткие когнитивные темпоральные карты
- коалиционные когнитивные карты
- динамические когнитивные карты

Р и с. 6. Типы нечетких когнитивных карт  
Fig. 6. Types of fuzzy cognitive maps

В исследовании<sup>8</sup> предложены когнитивные карты, построенные на основе нечеткой логики и казуальной алгебры специального вида. В [22] предложено построение темпоральных когнитивных карт, позволяющих проводить анализ и прогнозирование состояния сложных систем с учетом нестохастической неопределенности, нелинейного взаимовлияния, а также частичной несогласованности и наличия причинно-следственных связей между компонентами многомерного временного ряда. В [23] рассмотрены динамические когнитивные сети, которые являются расширением нечеткой когнитивной карты. Каждый концепт такой сети имеет свой собственный набор значений, что позволяет более точно определить динамические причинно-следственные связи. В [24] разработан подход к когнитивному моделированию сложных систем, базирующийся на представлении каждого ситуационного фактора в виде простой когнитивной карты. Предложенное построение обладает иерархической структурой, обеспечивает уточненное представление больших данных, а также позволяет установить скрытые взаимосвязи между важными факторами. Весовые значения взаимосвязей между факторами карты на каждом уровне вложенности определяются с помощью применения алгоритмов эволюционного обучения. В [25; 26] описано применение различных комбинированных методов построения нечетких когнитивных карт для решения прикладных задач энергетики.

Разработка динамических когнитивных карт является интенсивно развивающимся научным направлением, в котором имеется ряд нерешенных задач. Этот тип когнитивных карт применяется для моделирования различных динамических процессов, например, социально-экономических, экологических процессов и процессов функционирования технических систем. В качестве эффективного средства для разработки нечетких когнитивных карт, наиболее адекватно описывающих исследуемый процесс (или изучаемую систему), стоит выделить реализацию процедур обучения. С помощью алгоритмов

обучения, аналогичных алгоритмам в искусственных нейронных сетях, можно более точно провести настройку причинно-следственных связей.

В следующем разделе рассматривается построение и изучаются особенности когнитивных карт для моделирования управляемых маятниковых систем с интеллектуальными компонентами.

## Построение динамических когнитивных карт для маятниковых систем

Управляемые маятниковые системы служат для описания широкого класса динамических процессов. Следует отметить особую значимость модели перевернутого маятника и ее обобщений, связанную с возможностями описания и исследования инновационных технических и промышленных объектов. С помощью модели перевернутого маятника можно описать динамику составных частей сложных управляемых технических систем, например, подсистемы звеньев роботов-манипуляторов, шагающих роботов и других многосвязных управляемых систем (буксира, толкающего баржи, локомотива-толкача, автотрainsа с несколькими прицепами). Модель перевернутого маятника используют в биомеханике при изучении двигательных действий человека.

Изучение процессов, присущих управляемым маятниковым системам, часто связано с затруднениями при решении задач построения стабилизирующих регуляторов, что обусловлено многообразием различных физических эффектов, нестационарностью объекта, наличием неконтролируемых возмущающих воздействий. Применение интеллектуального управления в маятниковых системах направлено на решение указанных задач.

Математическая модель, описывающая динамику управляемого перевернутого маятника, задается системой дифференциальных уравнений вида<sup>9</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{g \sin(x_1(t)) - amlx_2^2(t)\sin(2x_1(t)) / 2 - a \cos(x_1(t)) u(t)}{4l/3 - aml \cos^2(x_1(t))}, \quad (1) \end{aligned}$$

где величины, входящие в (1), описаны в таблице 1. Задача регулятора состоит в формировании такого управляющего воздействия по отношению к каретке, которое позволит стабилизировать маятник в верхнем положении.

Т а б л и ц а 1. Переменные и параметры модели (1)

Table 1. Model (1) variables and parameters

Переменная / параметр	Название переменной/параметра
$x_1$	угол отклонения маятника от вертикали
$x_2$	угловая скорость
$u(t)$	управляющее воздействие, вырабатываемое регулятором
$t$	время
$l$	длина стержня, удерживающего маятник
$a = 1/(m + M)$	параметр, зависящий от массы маятника $m$ и массы каретки $M$
$g$	гравитационная постоянная

<sup>8</sup> Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС, 1995. 228 с.

<sup>9</sup> Игонина Е. В., Масина О. Н., Дружинина О. В. Анализ устойчивости динамических систем на основе методов интеллектуального управления и свойств линейных матричных неравенств. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2020. 174 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42819544> (дата обращения: 14.12.2021).





Маятниковые системы с интеллектуальными компонентами допускают описание на основе моделей Такаги-Сугено (ТС-моделей). Важно подчеркнуть, что ТС-модель является универсальным аппроксиматором: гладкая нелинейная управляемая модель при ряде принятых ограничений может быть аппроксимирована с помощью ТС-модели<sup>10</sup>. ТС-модель описывается нечеткими правилами импликации вида «если ..., то», которые представляют собой локальные линейные отношения «вход-выход» нелинейной системы. Применяемые правила являются нечеткими в части «если», а в части «то» содержатся дифференциальные уравнения, описывающие динамику процесса.

Динамическая ТС-модель управляемой системы имеет следующий вид<sup>11</sup>:

$$\Pi_i: \text{если } z_i(t) \text{ есть } M_i^j \text{ и } \dots \text{ и } z_p(t) \text{ есть } M_p^i, \\ \text{то } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad y(t) = C_i x(t) \quad i = 1, \dots, r. \quad (2)$$

Входящие в (2) обозначения представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2. Обозначения в ТС-модели вида (2)  
T a b l e 2. Notation in the TS-model of the form (2)

Принятые обозначения	Название
$x(t) \in R^n$	вектор состояния
$u(t) \in R^m$	вектор входа
$y(t) \in R^q$	вектор выхода
$A_i \in R^{n \times n}, B_i \in R^{n \times m}, C_i \in R^{q \times n}$	матрицы состояния системы
$z(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$	вектор известных переменных посылок (функции внешних возмущений или времени, фазовых переменных), характеризующихся лингвистической переменной «величина»
$M_j^i$	нечеткая функция, отвечающая $i$ -му правилу и $j$ -му параметру
$r$	количество правил модели

Каждое линейное уравнение вида  $\dot{x} = A_i x(t) + B_i u(t)$  в консеквентной части правила  $\Pi_i$  определяет подсистему. Любому правилу соответствует весовая функция  $w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_j^i(z_j(t))$ .

Векторы  $\dot{x}(t)$  и  $y(t)$ , входящие в (2), представимы в виде

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t))$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t)$$

$$\text{где } h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}$$

Так как  $w_i(z(t)) \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0$ , то  $h_i(z(t)) \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$ ,  $i = 1, \dots, r$ .

Для построения стабилизирующего регулятора используется параллельно распределенная компенсация, согласно которой любое правило регулятора синтезируется из соответствующего правила ТС-модели. Регулятор для модели (2) представляет собой комбинацию линейных связанных между собой регуляторов и задается равенством вида:

$$u(t) = - \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t)$$

где  $F_i$  – матрица коэффициентов усиления.

Отметим, что в работе<sup>12</sup> дано подробное описание процедуры аппроксимации модели (1) перевернутого маятника ТС-моделью (2) и проведена редукция количества правил (количество правил уменьшено до двух) без потери информативности модели. В итоге ТС-модель перевернутого маятника задается правилами вида:

$$\Pi_1: \text{если } x_1(t) \text{ в окрестности } 0, \text{ то} \\ \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \quad (3)$$

$$\Pi_2: \text{если } x_1(t) \text{ в окрестности } \pm \pi/2 \left( |x_1| < \pi/2 \right), \\ \text{то } \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t)$$

$$\text{где } \tilde{\delta} = (\tilde{\delta}_1 \quad \tilde{\delta}_2)^T \text{ – вектор состояния, } A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 4l/3 - aml & 0 \end{pmatrix}, \\ A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \pi(4l/3 - aml\beta^2) & 0 \end{pmatrix}, B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ a \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -a\beta \end{pmatrix}, \\ \beta = \cos(\pi/2 - \varepsilon),$$

$\varepsilon$  – малое положительное число такое, что разность  $\pi/2 - \varepsilon$  близка к  $\pi/2$ .

Для ТС-модели (3) перевернутого маятника управлению отвечают правила вида:

$$\Pi_1: \text{если } x_1(t) \text{ в окрестности } 0, \text{ то } u(t) = -F_1 x(t) \\ \Pi_2: \text{если } x_1(t) \text{ в окрестности } \pm \pi/2 \left( |x_1| < \pi/2 \right), \\ \text{то } u(t) = -F_2 x(t) \quad (4)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – матрицы коэффициентов усиления.

Логический регулятор для (3) задается следующим образом:

$$u(t) = -h_1(x_1(t))F_1 x(t) - h_2(x_1(t))F_2 x(t), \quad (5)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – функции принадлежности для правил  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  соответственно,  $h_1 + h_2 = 1$ .

Рассмотрим подход к моделированию маятниковых систем на основе нечеткой когнитивной карты для ТС-модели. В рамках

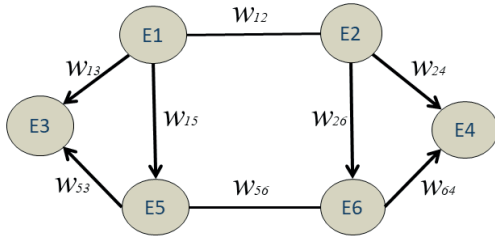
<sup>10</sup> Tanaka K., Wang H. O. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 320 p.

<sup>11</sup> Игонина Е. В., Масина О. Н., Дружинина О. В. Анализ устойчивости динамических систем на основе методов интеллектуального управления и свойств линейных матричных неравенств. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2020. 174 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42819544> (дата обращения: 14.12.2021).

<sup>12</sup> Там же.



этого подхода предлагается построение когнитивной карты с шестью концептами, шестью ориентированными и двумя неориентированными ребрами (рис. 7).



Р и с. 7. Когнитивная карта, отвечающая ТС-модели перевернутого маятника

Fig. 7. Cognitive map corresponding to the Takagi-Sugeno inverted pendulum model

На рис. 7 вершина E1 соответствует состоянию фазовой переменной  $x_1$  в окрестности нуля (часть «если» правила  $\Pi_1$ ) модели (3), вершина E2 соответствует значению  $x_1$  в окрестности  $\pm\pi/2$  (часть «если» правила  $\Pi_2$ ) модели (3). Вершина E3 определяет точку траектории управляемой системы в окрестности нулевого угла в фиксированный момент времени (часть «то» правила  $\Pi_1$ ), вершина E4 задает точку траектории рассматриваемой системы в окрестности  $\pm\pi/2$  в фиксированный момент времени (часть «то» правила  $\Pi_2$ ) модели (3). Вершины E5 и E6 определяют управляющее воздействие регулятора соответственно выбранным углам отклонения маятника от положения равновесия (часть «то» правила  $\Pi_1$  и правила  $\Pi_2$  в (4)). С помощью неориентированных ребер  $w_{12}$  и  $w_{56}$  предлагается интерпретировать работу правил функционирования нечеткого вывода с функциями принадлежности  $h_i$  ( $i=1, 2$ ) модели (3) и регулятора (5). Ориентация ребер  $w_{12}$  и  $w_{56}$  определяется весовыми соотношениями в динамической когнитивной карте в фиксированный момент времени. Предусматривается возможность динамического изменения когнитивной карты с течением времени.

Таким образом, предложено построение когнитивной карты для маятниковых систем с учетом динамического изменения весовых соотношений. При рассматриваемом подходе к когнитивному моделированию устанавливается соответствие между формализованным описанием ТС-модели и динамической когнитивной картой интеллектуальной маятниковой системы.

Динамический смысл предложенной когнитивной карты связан как с изменением процессов, происходящих в маятниковой системе (изменение угла наклона, времени), так и с изменением весовых коэффициентов. С учетом этого возможна фиксация когнитивных карт в виде двух вариантов синтеза, а именно, в первом варианте в большей степени учитывается поведение траекторий, а во втором варианте в большей степени учитываются знания экспертов с выбором функций принадлежности.

Следует отметить, что в работе<sup>13</sup> проведена верификация

модели (3), а ее устойчивость исследована с использованием свойств линейных матричных неравенств. Построение линейных матричных неравенств, необходимых для анализа ТС-модели (3), проводилось на основе достаточных условий устойчивости (асимптотической устойчивости). Приведены результаты численного анализа модели (3) без использования когнитивных карт. Модельные расчеты показали, что для каждого начального условия можно построить стабилизирующий регулятор (5).

Когнитивную карту, отвечающую ТС-модели перевернутого маятника (3), можно использовать для разработки обобщенного алгоритма стабилизации вблизи неустойчивого положения равновесия. Базовый алгоритм, предложенный в исследовании<sup>14</sup>, основан на поиске допустимых областей для фазовых переменных и определении условий устойчивости состояния равновесия перевернутого маятника. Результатом реализации этого алгоритма при заданном наборе начальных данных и параметров является построение стабилизирующего регулятора. Обобщенный алгоритм, включающий в себя синтез нечеткой когнитивной карты, учитывает возникающие причинно-следственные связи между концептами маятниковой системы и весовые соотношения, что в сочетании с условиями устойчивости позволяет упростить подход к решению задачи стабилизации с учетом наглядности представления в виде графа.

Установим взаимосвязь обобщенного алгоритма с базовым алгоритмом и представим ее поэтапно. Предположим, что о поведении маятника известна лишь априорная информация: состояния модели определяются фазовыми переменными (концептами)  $x_1$  и  $x_2$ . Обобщенный алгоритм состоит из следующих этапов.

Этап 1. Задать значения концептов когнитивной карты.

Этап 2. С учетом принятия концептами всевозможных комбинаций значений лингвистических термов задать базу правил регулятора в виде:

$\Pi_i$ : если  $x_1$  есть  $M_1^i$  и  $x_2$  есть  $M_2^i$ , то  $u = u_i(x)$ ,  $i=1, \dots, r$ , (6)

где  $M_1^i$ ,  $M_2^i$  – терм-множества, содержащие лингвистические значения входных переменных  $x_1$  и  $x_2$ .

Этап 3. Определить активную область  $A_i$  правила  $\Pi_i$ , необходимую для аналитического определения значений  $u = u_i(x)$ .

Этап 4. Определить функции  $G_1(x)$ ,  $G_2(x)$  и множества  $G_2^0 = \{x \in E | G_2(x) = 0\}$ ,  $G_2^+ = \{x \in E | G_2(x) > 0\}$ ,

$G_2^- = \{x \in E | G_2(x) < 0\}$ .

Этап 5. Сформировать базу правил регулятора.

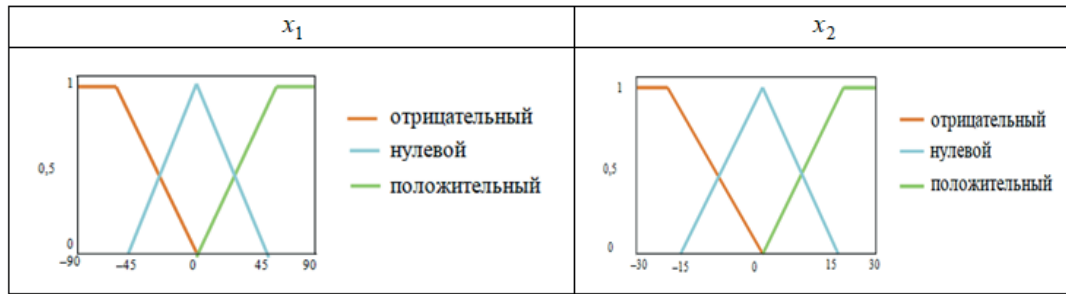
На первом этапе для описания значений концептов когнитивной карты ТС-модели перевернутого маятника воспользуемся лингвистическими термами: положительный (P) – отклонение вправо от требуемого вертикального положения до  $+\pi/2$ , нулевой (Z) – отклонение в окрестности нуля, отрицательный (N) – отклонение влево от требуемого вертикального положения до  $-\pi/2$ , которые задают вершины E1 и E2 когнитивной карты.

С учетом построения правил (6) задаются активные области правил  $\Pi_i$ , причем функции принадлежности терм-значений  $x_1$  и  $x_2$  согласуются с допустимой областью значений фазовых переменных (рис. 8).

<sup>13</sup> Там же.

<sup>14</sup> Там же.





Р и с. 8. Взаимосвязь концептов когнитивной карты с допустимой областью значений фазовых переменных  
Fig. 8. Interrelation of concepts of a cognitive map with the admissible range of values of phase variables

Некоторые свойства функций  $G_1(x)$ ,  $G_2(x)$ , используемых на четвертом этапе, изучены в работе<sup>15</sup>. Для рассматриваемой модели (3) получим:

$$G_1(x) = 2x_2 \left( x_1 + \frac{g}{l} \sin(x_1) \right), \quad G_2(x) = -\frac{2x_2}{(m+M)l^2},$$

$$G_2^0 = \{(x_1, 0) \in X : x_1 \in [-1; 1]\},$$

$$G_2^- = \{(x_1, x_2) \in X : x_2 > 0\},$$

$$G_2^+ = \{(x_1, x_2) \in X : x_2 < 0\},$$

$$-\frac{G_1(x)}{G_2(x)} = l(m+M)(x_1 l + g \sin(x_1)).$$

В результате реализации правил  $\Pi_i$  на пятом этапе осуществляется поиск  $u_i(x)$  согласно условиям:

$$u_i(x) \leq -\frac{G_1(x)}{G_2(x)} \text{ для } x \in A_i \cap G_2^+ \text{ и } u_i(x) \geq -\frac{G_1(x)}{G_2(x)} \text{ для}$$

$$x \in A_i \cap G_2^-, \text{ где } i = 1, \dots, 9.$$

Полученные значения  $u_i$  в фиксированный момент времени определяют соответствие значениям вершин E5 и E6 когнитивной карты и позволяют определить положение точки на траектории, т.е. задают вершины E3 и E4. Например, для положительного значения концепта  $x_1$  и положительного значения концепта  $x_2$  активная область определяется следующим образом:  $A_1 = (0^0; 88^0] \times (0^0; 30^0]$ , тогда  $A_1 \cap G_2^+ = \emptyset$  и  $A_1 \cap G_2^- = (0^0; 88^0] \times (0^0; 30^0]$ . С учетом условий четвертого этапа будем иметь  $u_1(x) \geq -\frac{G_1(x)}{G_2(x)}$ . Тогда

$u_1(x) = l(m+M)(x_1 l + g)$ . Для рассматриваемых значений концептов получим:

$$\Pi_1: \text{если } x_1 \text{ есть P, } x_2 \text{ есть P, то } u_1(x) = l(m+M)(x_1 l + g).$$

Отметим, что задание правил регулятора для других значений концептов когнитивной карты определяется аналогичным образом.

В дальнейшем предполагается создание программного обеспечения для построения и анализа когнитивных карт с учетом различных физических эффектов в маятниковых системах. Отметим, что теоретический и прикладной интерес представляет создание алгоритмов для автоматизации перехода от когнитивных карт к дифференциальным моделям (и наоборот), описывающих системы с неполной информацией. Такой подход к созданию программного обеспечения позволит осуществить верификацию динамических интеллектуальных моделей с применением когнитивных карт, а также позволит упростить синтез и исследование сложных динамических систем с учетом неопределенностей.

## Заключение

В настоящей статье предложен подход к построению динамических когнитивных карт для моделирования маятниковых систем с применением интеллектуальных технологий. Разработанный алгоритм стабилизации базируется на использовании когнитивных карт, на построении допустимых областей концептов и на проверке выполнимости условий устойчивости. Рассмотренный подход позволяет синтезировать модели перевернутого маятника с учетом различных физических эффектов и решать ряд задач управления маятниковыми системами. Построение нечетких когнитивных карт демонстрирует эффективность применяемых инструментов искусственного интеллекта для моделирования слабо формализуемых управляемых систем. Результаты могут быть использованы при моделировании управляемых технических систем с применением интеллектуальных методов и когнитивных технологий. Перспективным направлением исследований с применением рассмотренного подхода к моделированию является разработка когнитивных карт для уравнений движения связанных маятников, которые используются для моделирования механических, акустических, электрических систем. Следует отметить также перспективность разработки алгоритмов построения динамических когнитивных карт и последующей реализации этих алгоритмов с использованием высокоуровневых языков программирования и с привлечением математических библиотек, обладающих возможностями интеллектуальных вычислений.

<sup>15</sup> Там же.



**Список использованных источников**

- [1] Максимов В. И., Корноушенко Е.К., Качаев С.В. Когнитивные технологии для поддержки принятия управленческих решений // Информационное общество. 1999. № 2. С. 50-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9117914> (дата обращения: 14.12.2021).
- [2] Бялецкая Е. М., Квятковская Ю. И. О принципах когнитивного моделирования сложных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2006. № 1(30). С.116-119. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11528197> (дата обращения: 14.12.2021).
- [3] Горелова Г. В., Калининченко А. И. Инструментарий когнитивного моделирования сложных систем // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции. СПб.: СПбПУ, 2018. С. 399-412. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35506616> (дата обращения: 14.12.2021).
- [4] Калининченко А. И. О программной системе когнитивного моделирования сложных систем как элементе искусственного интеллекта // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции. СПб.: Политех-Пресс, 2019. С. 471-478. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38582570> (дата обращения: 14.12.2021).
- [5] Борисов В. В., Федулов А. С. Нечеткий когнитивный анализ и моделирование слабо формализуемых проблем // Системы компьютерной математики и их приложения. 2018. № 19. С. 113-117. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35177106> (дата обращения: 14.12.2021).
- [6] Луценко Е. В., Серга Г. В. Теория информации и когнитивные технологии в моделировании сложных многопараметрических динамических технических систем [Электронный ресурс] // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 121(07). С. 68-115. doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-121-002>
- [7] Веремей Е. И. Когнитивная реализация оптимизационного подхода к синтезу законов управления подвижными объектами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12, № 1. С. 98-107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27539223> (дата обращения: 14.12.2021).
- [8] Редько В. Г., Сохова З. Б. На пути к моделированию мышления // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2017. № 6-2(80). С. 203-209. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32826404> (дата обращения: 14.12.2021).
- [9] Кулинич А. А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2010. № 3. С. 2-16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14931713> (дата обращения: 14.12.2021).
- [10] Заграновская А. В. Системный анализ на основе нечетких когнитивных карт // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2018. № 4(100). С. 152-160. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35418420> (дата обращения: 14.12.2021).
- [11] Щербатов И. А. Нечеткие когнитивные карты как инструмент представления структур слабоформализуемых систем // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. трудов V Межд. юбилейной научной конф. Саратов: СГТУ; ООО СПО «Лоди», 2017. С. 375-378. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32690641> (дата обращения: 14.12.2021).
- [12] Горелова Г. В. Исследование проблем системы образования. Когнитивное моделирование // Образовательные технологии. 2018. № 3. С. 60-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35606519> (дата обращения: 14.12.2021).
- [13] Дружинина О. В., Игонина Е. В., Масина О. Н., Петров А. А. Аспекты использования технологий прототипирования и искусственного интеллекта в рамках цифровой трансформации образовательного процесса // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16, № 1. С. 50-63. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202001.50-63>
- [14] Костенко К. И., Лебедева А. П., Левицкий Б. Е. Анализ и синтез когнитивных структур при моделировании содержания областей знаний // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12, № 2. С. 50-55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28151020> (дата обращения: 14.12.2021).
- [15] Васильев С. Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. I // Интеллектуальные системы. 1999. Т. 4, № 1-2. С. 19-72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38546791> (дата обращения: 14.12.2021).
- [16] Васильев С. Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. II // Интеллектуальные системы. 1999. Т. 4, № 3-4. С. 5-48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37341654> (дата обращения: 14.12.2021).
- [17] Vassilyev S. N., Novikov D. A., Bakhtadze N. N. Intelligent Control of Industrial Processes // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46, issue 9. P. 49-57. doi: <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00643>
- [18] Дружинина О. В., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Масина О. Н., Петров А. А. Развитие инструментального обеспечения отечественной вычислительной платформы «Эльбрус 801-РС» в задачах нейросетевого моделирования нелинейных динамических систем // Нелинейный мир. 2021. Т. 19, № 1. С. 15-28. doi: <https://doi.org/10.18127/jj20700970-202101-02>
- [19] Druzhinina O. V., Masina O. N., Petrov A. A. Up-to-date Software and Methodological Support for Studying Models of Controlled Dynamic Systems Using Artificial Intelligence // Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems; R. Silhavy (ed.). Vol. 228. Springer, Cham, 2021. P. 670-681. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6_65)
- [20] Федулов А. С., Борисов В. В. Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 1. С. 66-80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25624932> (дата обращения: 14.12.2021).



- [21] Chi Y., Liu J. Learning of Fuzzy Cognitive Maps With Varying Densities Using A Multiobjective Evolutionary Algorithm // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2016. Vol. 24, no. 1. P. 71-81. doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2015.2426314>
- [22] Борисов В. В., Луферов В. С. Метод многомерного анализа и прогнозирования состояния сложных систем и процессов на основе нечетких когнитивных темпоральных моделей // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 1-23. doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10201>
- [23] Miao Y., Liu Z.-Q Siew C.K., Miao C. Y. Dynamical cognitive network – an extension of fuzzy cognitive map // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2001. Vol. 9, no. 5. P. 760-770. doi: <https://doi.org/10.1109/91.963762>
- [24] Poczeta K., Papageorgiou E. I., Gerogiannis V. C. Fuzzy Cognitive Maps Optimization for Decision Making and Prediction // Mathematics. 2020. Vol. 8, issue 11. Article number: 2059. doi: <https://doi.org/10.3390/math8112059>
- [25] Kim J.-Y., Cho S.-B. Electric energy consumption prediction by deep learning with state explainable autoencoder // Energies. 2019. Vol. 12, issue 4. Article number: 739. doi: <https://doi.org/10.3390/en12040739>
- [26] Orang O., Silva R., de Lima e Silva P. C., Guimaraes F. G. Solar Energy Forecasting With Fuzzy Time Series Using High-Order Fuzzy Cognitive Maps // 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). IEEE Press, 2020. P. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/FUZZ48607.2020.9177767>

Поступила 14.12.2021; одобрена после рецензирования 11.02.2022; принята к публикации 26.02.2022.

#### Об авторах:

**Дружинина Ольга Валентиновна**, главный научный сотрудник, ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44-2), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9242-9730>, [ovdruzh@mail.ru](mailto:ovdruzh@mail.ru)

**Масина Ольга Николаевна**, заведующий кафедрой математического моделирования, компьютерных технологий и информационной безопасности, Институт математики, естественных наук и техники, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина» (399770, Российская Федерация, Липецкая область, г. Елец, ул. Коммунаров, д. 28-1), доктор физико-математических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-7217>, [olga121@inbox.ru](mailto:olga121@inbox.ru)

**Игонина Елена Викторовна**, доцент кафедры математического моделирования, компьютерных технологий и информационной безопасности, Институт математики, естественных наук и техники, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина» (399770, Российская Федерация, Липецкая область, г. Елец, ул. Коммунаров, д. 28-1), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-6219>, [elenaigonina7@mail.ru](mailto:elenaigonina7@mail.ru)

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## References

- [1] Maksimov V.I., Kornoushenko E.K., Kachaev S.V. *Kognitivnye tehnologii dlja podderzhki prinjatija upravlencheskih reshenij* [Cognitive technologies for supporting managerial decision-making]. *Informacionnoe obshchestvo = Information Society*. 1999; (2):50-54. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9117914> (accessed 14.12.2021). (In Russ.)
- [2] Byaletskaia E.M., Kvyatkovskaya I.Yu. *O principah kognitivnogo modelirovaniia slozhnykh sistem* [Principles of cognitive modeling complex systems]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2006; (1):116-119. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11528197> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [3] Gorelova G.V., Kalinichenko A.I. *Instrumentarij kognitivnogo modelirovaniia slozhnykh sistem* [Cognitive modeling software system]. *Proceedings of the International Conference on System analysis in design and management*. SPbPU, SPb.; 2018. p. 399-412. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35506616> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [4] Kalinichenko A.I. *O programnoj sisteme kognitivnogo modelirovaniia slozhnykh sistem kak jelemente iskusstvennogo intellekta* [On the program system of cognitive modeling of complex systems as an element of artificial intelligence]. *Proceedings of the International Conference on System analysis in design and management*. Polytech-Press, SPb.; 2019. p. 471-478. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38582570> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Borisov V.V., Fedulov A.S. *Nechetkij kognitivnyj analiz i modelirovanie slabo formalizuemym problem* [Fuzzy cognitive analysis and simulation of non-formalized problems]. *Sistemy komp'yuternoj matematiki i ih prilozheniya = Computer Mathematics Systems and Their Applications*. 2018; (19):113-117. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35177106> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [6] Lutsenko E.V., Serga G.V. *Teorija informacii i kognitivnye tehnologii v modelirovanii slozhnykh mnogoparametricheskikh dinamicheskikh tehniceskikh sistem* [The information theory and cognitive technologies in modeling complex multivariable dynamic technical systems]. *Nauchnyj zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubGAU*. 2016; (121):68-115. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-121-002>
- [7] Veremey E.I. Cognitive implementation of optimization approach to the control system design for moving object. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2016; 12(1):98-107. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27539223> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)



- [8] Red'ko V.G., Sokhova Z.B. On the way to the modeling of thinking. *Izvestija Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN = News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017; (6-2):203-209. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32826404> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [9] Kulinich A.A. *Komp'yuternye sistemy modelirovaniya kognitivnykh kart: podhody i metody* [Cognitive Maps Modelling Computer Systems: Approaches and Methods]. *Problemy upravlenija = Control Sciences*. 2010; (3)2-16. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14931713> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [10] Zagranovskaya A.V. *Sistemnyj analiz na osnove nechetkih kognitivnykh kart* [System analysis on the basis of imprecise cognitive cards]. *Vestnik Rossijskogo jekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plehanova = Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2018; (4):152-160. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35418420> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [11] Shcherbatov I.A. *Nechetkie kognitivnye karty kak instrument predstavlenija struktur slaboformalizuemym sistem* [Fuzzy cognitive maps as a tool for structure representation of poorly formalizable systems]. *Proceedings of the V International Jubilee Scientific Conference on Problems of Management, Processing and Transmission of Information*. SSTU, Saratov; 2017. p. 375-378. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32690641> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [12] Gorelova G.V. *Issledovanie problem sistemy obrazovaniya. Kognitivnoe modelirovanie* [Research of problems of the education system. Cognitive modeling]. *Obrazovatel'nye tehnologii = Educational Technologies*. 2018; (3):60-75. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35606519> (accessed 14.12.2021). (In Russ.)
- [13] Druzhinina O.V., Igonina E.V., Masina O.N., Petrov A.A. Aspects of Prototyping Technologies and Artificial Intelligence Use in the Framework of the Digital Transformation of the Educational Process. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2020; 16(1):50-63. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202001.50-63>
- [14] Kostenko K.I., Lebedeva A.P., Levitskii B.E. Cognitive structures analysis and synthesis for simulation the knowledge areas contents. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2016; 12(2):50-55. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28151020> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [15] Vassilyev S.N. *Ot klassicheskikh zadach regulirovaniya k intellektual'nomu upravleniju. I* [From classical control problems to intelligent control]. *Intellektual'nye Sistemy = Intelligent Systems*. 1999; 4(1-2):19-72. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38546791> (accessed 14.12.2021). (In Russ.)
- [16] Vassilyev S.N. *Ot klassicheskikh zadach regulirovaniya k intellektnomu upravleniju. II* [From classical problems of regulation to intelligent management]. *Intellektual'nye Sistemy = Intelligent Systems*. 1999; 4(3-4):5-48. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37341654> (accessed 14.12.2021). (In Russ.)
- [17] Vassilyev S.N., Novikov D.A., Bakhtadze N.N. Intelligent Control of Industrial Processes. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013; 46(9):49-57. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00643>
- [18] Druzhinina O.V., Korepanov E.R., Belousov V.V., Masina O.N., Petrov A.A. Development of the instrumental support of the domestic computing platform "Elbrus 801-PC" in the problems of neural network modeling of nonlinear dynamic systems. *Nelinejnyj mir = Nonlinear World*. 2021; 19(1):15-28. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202101-02>
- [19] Druzhinina O.V., Masina O.N., Petrov A.A. Up-to-date Software and Methodological Support for Studying Models of Controlled Dynamic Systems Using Artificial Intelligence. In: Silhavy R. (ed.) *Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 228. Springer, Cham; 2021. p. 670-681. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6_65)
- [20] Fedulov A.S., Borisov V.V. Models of System Dynamics Based on Fuzzy Relational Cognitive Maps. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2016; (1):66-80. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25624932> (accessed 14.12.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [21] Chi Y., Liu J. Learning of Fuzzy Cognitive Maps With Varying Densities Using A Multiobjective Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2016; 24(1):71-81. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2015.2426314>
- [22] Borisov V.V., Luferov V.S. The method of multidimensional analysis and forecasting states of complex systems and processes based on Fuzzy Cognitive Temporal Models. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2020; (2):1-23. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10201>
- [23] Miao Y., Liu Z.-Q Siew C.K., Miao C.Y. Dynamical cognitive network – an extension of fuzzy cognitive map. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2001; 9(5):760-770. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/91.963762>
- [24] Poczeta K., Papageorgiou E.I., Gerogiannis V.C. Fuzzy Cognitive Maps Optimization for Decision Making and Prediction. *Mathematics*. 2020; 8(11):2059. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/math8112059>
- [25] Kim J.-Y., Cho S.-B. Electric energy consumption prediction by deep learning with state explainable autoencoder. *Energies*. 2019; 12(4):739. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/en12040739>
- [26] Orang O., Silva R., de Lima e Silva P.C., Guimaraes F.G. Solar Energy Forecasting With Fuzzy Time Series Using High-Order Fuzzy Cognitive Maps. *2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE Press; 2020. p. 1-8. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/FUZZ48607.2020.9177767>

Submitted 14.12.2021; approved after reviewing 11.02.2022; accepted for publication 26.02.2022.



**About the authors:**

**Olga V. Druzhinina**, Chief Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences (44 Vavilov St., building 2, Moscow 119333, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9242-9730>**, ovdruz@mail.ru

**Olga N. Masina**, Head of the Chair of Mathematical Modeling, Computer Technologies and Information Security, Institute of Mathematics, Natural Science and Technology, Bunin Yelets State University (28-1 Kommunarov St., Yelets 399770, Lipetsk region, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-7217>**, olga121@inbox.ru

**Elena V. Igonina**, Associate Professor of the Chair of Mathematical Modeling, Computer technologies and Information Security, Institute of Mathematics, Natural Science and Technology, Bunin Yelets State University (28-1 Kommunarov St., Yelets, 399770, Russia), Cand.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-6219>**, elenaigonina7@mail.ru

*All authors have read and approved the final manuscript.*

