

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**А.О. Алексеев**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29

E-mail: aoalekseev@pstu.ru

*Пермский центр поддержки принятия решений*

Россия, 614017, Пермь, Лебедева ул., 256

E-mail: alekseev\_ao@d2d-platform.tech

**Ключевые слова:** механизмы комплексного оценивания, нейронные сети, нейро-нечеткие сети, управление в технических системах.

**Аннотация:** механизмы комплексного оценивания являются базовым механизмом управления в теории управления организационными системами и, являясь механизмом оценки и контроля, традиционно используются для агрегирования результатов деятельности участников организационных систем в обобщенный показатель, учитывающий частные показатели в комплексе с учетом их важности для Центра. В настоящем докладе предлагается расширение области применения механизмов комплексного оценивания на задачи управления техническими системами. Это возможно благодаря возможности представления дискретных механизмов комплексного оценивания в виде искусственной нейронной сети с каскадной структурой. Известна процедура нечеткого комплексного оценивания, что делает возможным сравнить нейронные сети, построенные на основе механизмов комплексного оценивания, с уже известными нейро-нечеткими сетями. Нейро-нечеткие сети, в свою очередь, получили широкое применение в задачах управления техническими системами. В качестве демонстрационного примера выбрана задача управления транспортным средством, в которой используется модель нечеткого автомобиля. Известно, что данная задача эффективно решается с помощью нейро-нечетких сетей. Ожидается, что нейро-нечеткая нейронная сеть, построенная на основе механизма комплексного оценивания, будет обладать меньшим числом синаптических связей по сравнению с известными сетями, что будет давать определенные преимущества.

## 1. Введение

Механизмы комплексного оценивания (МКО) являются базовым механизмом управления в теории управления организационными системами [1] и традиционно используются для построения агрегированной оценки сложного объекта путем свертки большого числа показателей в единую шкалу [2]. Начиная с 80-х годов XX века накопилось множество прикладных задач, в которых МКО использовались для агрегирования частных показателей до одного или нескольких укрупненных показателей с учетом важности для Центра частных показателей.

Стоит заметить, что МКО, являясь механизмом оценки и контроля, используются не только для оценки результатов деятельности участников организационных систем. Так, рядом исследователей [3–5] МКО использовались для агрегирования информации о различных физико-механических свойствах строительных материалов для получения

агрегированного показателя, отражающего качество строительного материала. Для этих целей в ПНИПУ была разработана отдельная версия программного комплекса «Декон», сокращенно названная «Декон-СМ» [6], в котором буквы «СМ» являются аббревиатурой слов «строительные материалы». Другими исследователями из МГСУ [7] МКО использовался для оценки ограждающих строительных конструкций. Несмотря на имеющиеся примеры применения МКО для комплексного оценивания технических объектов, возможности их применения этим не ограничиваются.

В настоящем докладе предлагается расширение области применения МКО на задачи управления техническими системами как метода анализа данных и аппроксимации функций. Здесь также стоит отметить, что еще в 2020 и 2021 годах в докладах [8, 9] уже отмечалась возможность использования МКО как инструмента анализа данных. Однако, в обоих докладах [8, 9] демонстрировались примеры синтеза МКО на основе анализа социально-экономических систем. В 2022 году в докладах [10, 11] демонстрировалось применение МКО как инструмента анализа данных в медико-биологических системах. Отсутствие примеров анализа данных с помощью МКО в технических системах побудило подготовку настоящего доклада.

## **2. Основания для применения МКО в задачах управления техническими системами**

Возможность применения МКО в задачах управления техническими системами базируется на нескольких достижениях теории управления последних пяти лет.

Во-первых, на XIII Всероссийском совещании по проблемам управления (ВСПУ-2019) был сделан доклад [12], в котором была поставлена задача синтеза МКО на основе обучающего набора данных. Для решения этой задачи в работах [13, 14] в 2020 году был предложен унитарный подход к представлению МКО в виде произведения унитарных векторов и матриц, каждый элемент которой также представляется в виде унитарного вектора. Идея унитарного представления МКО легла в основу нейросетевого представления МКО. В 2020 году была показана возможность представления МКО с индексной процедурой комплексного оценивания в виде искусственной нейронной сети [15].

Во-вторых, в 2020 году в [16, 17] был предложен алгоритм идентификации МКО на основе обучающих примеров, основанный на преобразовании таблицы истинности. В 2021 году данный подход был обобщен [18] на случай любых деревьев критериев с бинарной структурой. Унитарный подход к идентификации МКО, предложенный в [13, 14] получил свое развитие в работах [19-22]. В 2023 была создана программа для синтеза МКО [23].

В-третьих, в 2021 году в [24] была продемонстрирована возможность агрегирования непрерывных показателей при унитарном представлении МКО. В том же году на семинаре ИПУ РАН по теории управления организационными системами были показаны примеры агрегирования показателей в нечетком виде при унитарном представлении МКО. Это позволило показать эквивалентность нечеткого комплексного оценивания при унитарном подходе известным процедурам нечеткого комплексного оценивания, которые представлялись на XII Всероссийском совещании по проблемам управления (ВСПУ-2014) [25].

В-четвертых, в 2022-2023 годах велась работа над многопользовательской виртуальной средой интеллектуального анализа данных «Data to Decisions» [26, 27], позволяющей проектировать нейронные сети на основе МКО [28]. В 2023 году был разработан программный модуль [29]. В названии программы [29] использовано словосочетание «корень принятия решений», которое было предложено в ходе

неоднократного обсуждения на семинаре по теории управления организационными системами. Судя по видео записям семинаров, а также лекций (см. например [30]), целью введения нового термина «корень принятия решений» было разграничение с терминами «деревья решений» или «деревья принятия решений». Несмотря на то, что автор настоящего доклада полностью согласен с авторами термина «корень принятия решений» и разделяет их позицию, в настоящем докладе повсеместно используется аббревиатура МКО. Такой выбор обусловлен целью доклада – показать возможность применения МКО не в задачах принятия решений в технических системах, а именно в задачах управления техническими системами.

### 3. Выбор примера задачи управления в технических системах

В настоящем докладе в качестве демонстрационного примера применения МКО в задаче управления технической системой рассматривается известная задача управления транспортным средством, состояние которого описывается с помощью модели нечеткого автомобиля [31]. Для решения данной задачи может применяться нейро-нечеткая нейронная сеть [32]. Примечательно, что в [32] используется подход к синтезу структуры нейронной сети, близкий к предложенному в [15] и развиваемому в [17, 28]. Построение нейро-нечетких сетей на основе МКО, эквивалентных [32], теоретически делает возможным применение МКО в задаче управления транспортными средствами. Однако, в [32] структура нейронной сети строится на основе полной таблицы истинности, которая при  $k$ -арной шкале и  $m$  переменных содержит  $k^m$  наборов. Это приводит к излишним элементам нейронной сети на третьем слое [32, с. 205, рис. 8] и излишним синаптическим связям между нейронами на втором и третьем слоях. Ключевым преимуществом МКО является их «экономный» способ представления дискретных функций – вместо  $k^m$  наборов, потребуется  $m-1$  бинарных матриц, т.е. размерность функции определяется  $k^2(m-1)$  параметрами, что значительно меньше  $k^m$ .

### 4. Заключение

Нейро-нечеткая нейронная сеть, построенная на основе МКО, будет обладать меньшим числом синаптических связей по сравнению с сетями построенными в [32], что должно, во-первых, сказаться на вычислительных возможностях системы управления транспортным средством, во-вторых, для обучения нейро-нечеткой сети, основанной на МКО, потребуется меньшее число обучающих примеров, в-третьих, снижается риск переобучения нейронной сети.

### Список литературы

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Издательство Московского психолого-социального института, 2005. 581 с.
2. Бурков В.Н., Буркова И.В. и др. Механизмы управления: Мультифункциональное учебное пособие // Под ред. Д.А. Новикова. М.: УРСС, 2011. [http://www.mtas.ru/search/search\\_results.php?publication\\_id=19136](http://www.mtas.ru/search/search_results.php?publication_id=19136) (дата обращения: 24.09.2021).
3. Шаманов В.А. Управление процессом дозирования компонентов автоклавного газобетона в условиях нестабильности качества сырья на основе моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки : диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06. Место защиты: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2015. 161 с.
4. Кривогино Д.Н. Информационная система выбора характеристик материалов строительных конструкций с использованием ассортиментного подхода: на примере тяжелого бетона: диссертация

- ... кандидата технических наук: 05.13.01. Место защиты: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2019. 218 с.
5. Сафонов Н.И. Повышение эффективности планирования ремонта жилого фонда на основе механизмов согласования интересов субъектов управления : диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.10. Место защиты: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2021. 238 с.
  6. Харитонов В.А., Голубев В.А., Шайдулин Р.Ф. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614933. Российская Федерация. Автоматизированная система анализа свойств строительных материалов на основе регрессионных моделей и комплексного оценивания («Декон-СМ»): № 2015611535: заявл. 10.03.2015; опубл. 29.04.2015; заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». EDN KUMKRJ.
  7. Жеглова Ю.Г. Методика выбора технических решений ограждающих конструкций нулевого цикла строительства на основе системного анализа и теории активных систем: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.01. Место защиты: Российский университет дружбы народов. М., 2021. 126 с.
  8. Сергеев В.А., Коргин Н.А. Идентификация механизмов комплексного оценивания как подход анализу дискретных данных // Управление большими системами: доклады XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Москва-Звенигород, 06-09 сентября 2021 г., Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. <https://ubs2021.ipu.ru/node/13279> (дата обращения: 08.09.2021).
  9. Sergeev V.A., Korgin N.A. Identification of integrated rating mechanisms as an approach to discrete data analysis // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 54, No. 13. P. 134-139. DOI 10.1016/j.ifacol.2021.10.433.
  10. Кожемякин Л.В., Никитин В.Н., Алексеев А.О. Применение корней принятия решений для определения взаимосвязи между магнитной восприимчивостью вен головного мозга и наличием болезни Альцгеймера // Управление большими системами: труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Челябинск, 05-08 сентября 2022 года. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. С. 318-324. EDN CAJUES.
  11. Kozhemyakin L.V., Alekseev A.O., Nikitin V.N. Application of Decisions' Roots for Data Analysis on Example of Dataset with Magnetic Susceptibility Values of the Brain Veins and the Alzheimer's Disease // Proceedings of 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency SUMMA 2022. Lipetsk, 09-11 November 2022. IEEE, 2022. P. 425-427. DOI 10.1109/SUMMA57301.2022.9973977.
  12. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Марин О.Л. Проблемы синтеза механизма комплексного оценивания на основе обучающего набора данных // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019): сб. тр. (Москва, 17-20 июня 2019 г.) / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. М.: ИПУ РАН, 2019. С. 2280-2284.
  13. Бурков В.Н., Сергеев В.А., Коргин Н.А. Идентификация механизмов комплексной оценки на основе унитарного кода // Управление большими системами. 2020. Вып. 87. С. 67-85.
  14. Burkov V.N., Sergeev V.S., Korgin N.A. Identification of integrated rating mechanisms as optimization problem // 2020 13th International Conference «Management of large-scale system development» (MLSD). 28-30 Sept. 2020, Moscow, Russia. IEEE, 2020. 5 p. No. 20153257. DOI 10.1109/MLSD49919.2020.9247638.
  15. Алексеев А.О. Представление механизмов комплексного оценивания в виде искусственных нейронных сетей // Математика и междисциплинарные исследования – 2020: Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Пермь, 12–14 октября 2020 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. С. 156-160.
  16. Алексеев А.О. Об одном подходе к идентификации механизмов комплексного оценивания на основе обучающего множества // Информационные системы и технологии: достижения и перспективы: II международная научная конференция. Республика Азербайджан, Сумгаит, 09-10 июля 2020 года / Сумгаит: Сумгаитский гос. ун-т, 2020. С. 117-120.
  17. Alekseev A. Identification of Integrated Rating Mechanisms Based on Training Set // Proceedings of 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency SUMMA 2020. Lipetsk, 10-13 November 2020. IEEE, 2020. P. 398-403. DOI 10.1109/SUMMA50634.2020.9280751.
  18. Alekseev A. Identification of Integrated Rating Mechanisms with Non-serial Structures of Criteria Tree // Proceedings of 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency SUMMA 2021. Lipetsk, 10-12 November 2021. IEEE, 2021. P. 599-603. DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632221.

19. Korgin N., Sergeev V. Identification of integrated rating mechanisms on complete data sets // *Advances in Production Management Systems / Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems (APMS 2021) / Under edition of the A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, G. von Cieminski, D. Romero. Cham: Springer, 2021. P. 610-616. (Book series: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 630). DOI 10.1007/978-3-030-85874-2\_66.*
20. Коргин Н.А., Сергеев В.А. Выбор структур при решении задач идентификации механизмов комплексного оценивания для полных наборов данных // *Материалы 14-й Мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2021. Дивноморское, Геленджик. Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. Т. 2. С. 158-160.*
21. Сергеев В.А. Синтез механизмов комплексного оценивания на основе разделительной декомпозиции // *Проблемы управления. 2022. № 6. С. 2-11. DOI 10.25728/ru.2022.6.1.*
22. Сергеев В.А., Коргин Н.А. Исследование чувствительности дискретной функции для решения задачи синтеза МКО на основе дискретных наборов данных // *XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2023: Материалы мультиконференции. Волгоград, 11-15 сентября 2023 года / Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов и др. Т. 2. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. С. 345-348. EDN BAEXQE.*
23. Сергеев В.А., Коргин Н.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618561 Российская Федерация. Сборщик полных бинарных деревьев на именованных листьях на основе данных анализа групп эквивалентности: № 2023617154; заявл. 14.04.2023; опублик. 26.04.2023; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. EDN NSHSVS.
24. Алексеев А.О. Агрегирование непрерывных показателей при унитарном представлении механизма комплексного оценивания // *Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 8. С. 59-62. DOI 10.52348/2712-8873\_ММТТ\_2021\_8\_59.*
25. Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Процедуры нечеткого комплексного оценивания // *XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014). Москва, 16-19 июня 2014 г.: сб. тр. / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 7983-7993.*
26. Алексеев А.О., Кожемякин Л.В. Концепция многопользовательской виртуальной среды интеллектуального анализа данных // *Управление большими системами: сборник научных трудов XIX Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Воронеж, 04-08 сентября 2023 года / Под ред. Новикова Д.А. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2023. С. 442-448.*
27. Многопользовательская виртуальная среда интеллектуального анализа данных «Data to Decisions». ООО «Пермский центр поддержки принятия решений». <https://d2d-platform.tech>. (дата обращения: 20.01.2024).
28. Алексеев А.О., Кожемякин Л.В. Проектирование нейронных сетей на основе дискретных механизмов комплексного оценивания // *Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 9. С. 55-58. DOI 10.52348/2712-8873\_ММТТ\_2023\_9\_55. EDN ZXEUHQ.*
29. Алексеев А.О., Кожемякин Л.В., Маккавеев А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685360 Российская Федерация. Программный модуль проектирования и обучения нейронных сетей, основанных на корнях принятия решений (Software Module for Designing and Training Decisions Root-based Neural Networks): № 2023684000; заявл. 13.11.2023; опублик. 27.11.2023.
30. Коргин Н.А., Сергеев В.А. Лекция Коргина Н.А. для студентов ДВФУ по корням принятия решений / *Лаборатория № 57 «Активных систем» ИПУ РАН. Москва, 2021. (1 ч 44 мин). <https://youtu.be/b4dF7znmVuo> (дата обращения: 19.10.2022). Дата публикации: 16.11.2021. Режим доступа: Лаборатория 57 ИПУ РАН // YouTube, свободный.*
31. Sugeno M., Nishida M. Fuzzy control of model car // *Fuzzy Sets and Systems. 1985. Vol. 16. P. 103-113.*
32. Lin C.T. A Neural Fuzzy Control System with Structure and Parameter Learning // *Fuzzy Sets and Systems. 1995. Vol. 70, Mo. 2-3. P. 183-212. DOI 10.1016/0165-0114(94)00216-T.*