



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-144-154

EDN: LRKTFT

Научная статья / Research article

Общие математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных домов на основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений

А.А. Меркулов^a, И.В. Степанян^b

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Российская Федерация

✉ amerkulov@levelgroup.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 января 2025 г

Доработана: 3 марта 2025 г.

Принята к публикации: 7 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Правильно спроектированная инженерная концепция жилого многоквартирного дома позволяет на этапе подготовки к строительству снизить имеющиеся риски и учесть факторы, которые на практике, ввиду ограниченного характера специализированных экспертных знаний, иногда остаются без должного внимания. В качестве методологической базы и основополагающих методов исследования выдвинуты теория экспертных систем и математический аппарат на основе нечеткой логики. Цель исследования — разработка математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству на основе теории нечетких множеств и методов поддержки принятия решений. Задача исследования — разработка общих математических принципов решения прикладных задач с применением специализированных экспертных систем. В результате исследования разработаны математические основы многофункциональной экспертной системы для формирования концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству; создана нечеткая база знаний; восстановлена проекция многомерной функции поверхности отклика, отображающая зависимость лингвистических переменных; разработаны математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству.

Ключевые слова: логические операции, нечеткие множества, алгоритм Мамдани, алгоритм Сугено, интеллектуальные системы

Вклад авторов

Меркулов А.А. — написание исходного текста, визуализация; Степанян И.В. — руководство, методология исследования, валидация.

Для цитирования

Меркулов А.А., Степанян И.В. Общие математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных домов на основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 144–154. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-144-154>

© Меркулов А.С., Степанян И.В., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

General Mathematical Principles for Determining the Engineering Concept of Apartment Buildings Based on Expert Analytical Methods and Decision Support Systems

Alexander A. Merkulov^a, Ivan V. Stepanyan^b

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bInstitute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ amerkulov@levelgroup.ru

Article history

Received: January 15, 2025

Revised: March 3, 2025

Accepted: March 7, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. A well-designed engineering blueprint for a residential apartment building can effectively mitigate potential hazards during the preparatory phase of construction. This approach enables the consideration of factors that, due to the constraints inherent in specialized expertise, frequently go unaddressed in practice. The theory of expert systems and mathematical apparatus based on fuzzy logic are put forward as the methodological basis and fundamental research methods. The objective of the present study is to formulate mathematical principles that facilitate the determination of the engineering concept of apartment buildings at the preparatory stage of construction, based on the theory of fuzzy sets and decision support methods. The research objective is to develop general mathematical principles for solving applied problems using specialized expert systems. The research yielded the development of the mathematical foundations of a multifunctional expert system for the conceptualization of apartment buildings during the preparatory phase of construction; a fuzzy knowledge base was created. The projection of a multidimensional response surface function has been restored, reflecting the dependence of linguistic variables. Mathematical principles for determining the engineering concept of multi-family residential buildings at the preparatory stage of construction have been developed.

Keywords: logical operations, fuzzy sets, Mamdani algorithm, Sugeno algorithm, intelligence systems

Authors' contribution

Merkulov A.A. — writing-original draft, visualization, validation; Stepanyan I.V. — supervision, methodology, investigation, validation.

For citation

Merkulov AA, Stepanyan IV. General mathematical principles for determining the engineering concept of apartment buildings based on expert analytical methods and decision support systems. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2): 144–154. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-144-154>

Введение

Развитие математической логики и природоподобных технологий способствовало значительному прогрессу в области искусственного интеллекта, что отражается на многих областях жизнедеятельности общества, в частности на сфере строительства. При этом стало очевидно, что подготовка к возведению объекта нуждается в системе поддержки принятия инженерных решений.

Актуальность рассматриваемой темы и востребованность соответствующих технологий обусловлены тем, что на практике на этапе проектирования строительных объектов порой допускаются ошибки, которые дорого обходятся как строительным организациям, так и городу. В связи с изложенным требуется разработка математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных домов с целью формализации знаний для их применения на этапе проектирования и поддержки при-

нения ключевых инженерных решений. Данная проблематика относится к сфере искусственного интеллекта. Нейросетевые технологии показали свою значимость, но требуют наличия обучающей выборки.

Существующие методы нечетких экспертных систем (ЭС) основаны на математических операциях, оперирующих экспертными знаниями на основе теории нечетких множеств. ЭС представляют собой интеллектуальные программы, основанные на экспертных знаниях, способные анализировать большой объем данных с учетом заданных параметров и формировать информацию, необходимую для принятия решений. *Цель исследования* — разработка общих математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству, а также разработка на их основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений.

1. Разработка общих математических принципов проектирования системы поддержки принятия инженерных решений в области строительства

Система поддержки принятия решений — автоматизированная информационная система, предназначенная для оказания помощи лицам, принимающим решения в неоднозначных, нечетких или сложных ситуациях¹ [1–3]. Использование нечеткой логики при создании ЭС позволяет учитывать нелинейную зависимость между переменными и использовать модели неопределенности в задачах строительства. Нечеткая и четкая логика — два разных подхода к описанию, представлению и формализации знаний. Инженерия знаний — область ИИ, изучающая организацию хранения и анализа знаний в экспертных системах, включая методы представления, приобретения, структурирования, поиска, извлечения и применения знаний [4].

Лингвистические переменные служат для обозначения объектов, которые могут быть ис-

пользованы в качестве аргументов при функционировании ЭС. Функции принадлежности в нечетком логическом выводе представляют собой математические функции, которыми удобно оперировать в условиях неопределенности или неполноты информации. Функция принадлежности определяет, насколько конкретное числовое значение принадлежит к определенной лингвистической переменной (или их набору), и возвращает степень принадлежности (от 0 до 1) элемента каждой категории. Функции принадлежности лингвистических переменных задаются в виде кривых, которые могут быть треугольными, трапециевидными, гауссовыми и другими — в зависимости от потребностей и характеристик решаемой задачи (рис. 1).

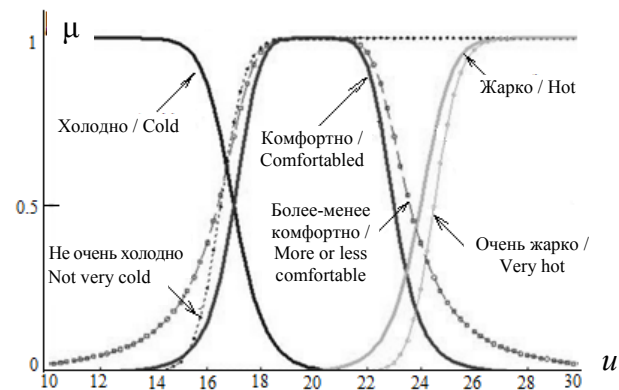


Рис. 1. Функции принадлежности лингвистической переменной «температура»
Источники: выполнено И.В. Степняном, А.А. Меркуловым

Figure 1. Membership functions of the linguistic variable “temperature”
Source: by I.V. Stepanyan, A.A. Merkulov

Объединение нечетких множеств позволяет объединить два или более нечетких множества в одно. Результатом объединения является новое нечеткое множество, включающее элементы, которые принадлежат хотя бы одному из исходных множеств. Операция объединения ($A \cup B$) определяется как максимум функций принадлежности элементов в этих множествах.

Пересечение нечетких множеств позволяет найти элементы, общие для двух или более не-

¹ Скитер Н.Н., Костинова А.В. Интеллектуальные системы на основе методов нечеткой логики : учеб. пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2020. 64 с. EDN: OGHNHR

четких множеств. Эта операция проводится, если нужно определить степень принадлежности элементов всем указанным нечетким множествам. Результатом операции пересечения ($A \cap B$) является новое нечеткое множество (рис. 2).

Основными и наиболее распространенными системами нечеткого логического вывода являются системы Мамдани (Mamdani) и Сугено (TS — Takagi-Sugeno). Выбор одной из них для построения экспертной системы зависит от конкретных требований ЭС. Алгоритм Сугено [5] используют, когда имеются количественные данные или математические модели для выражения взаимосвязи между входными и выходными данными. Модель Сугено может обрабатывать сложные отношения с меньшим количеством правил благодаря своей способности моделировать математические отношения. Алгоритм Сугено сложнее понять и интерпретировать. Модель Мамдани [6] может требовать более обширной базы знаний, но обеспечивает более высокую интерпретируемость благодаря работе с лингвистическими переменными и правилами.

Для построения экспертной системы целесообразно использовать алгоритм Мамдани, который адаптируется к структуре базы знаний (БЗ) и специфике строительной предметной области.

Алгоритм логического вывода Мамдани состоит из следующих шагов:

- 1) определение лингвистических переменных и их нечетких множеств;
- 2) создание базы знаний, которая логически связывает входные и выходные лингвистические переменные. Каждое правило состоит из условия («если...») и результата («то...»). Для пересечения степеней принадлежности, как правило, используется операция «и»;
- 3) агрегация выводов с объединением их в результирующее нечеткое множество путем объединения результатов правил для каждой лингвистической переменной. Далее приведена обобщенная схема алгоритма (рис. 3);
- 4) дефаззификация для преобразования полученного нечеткого множества в числовое значение.

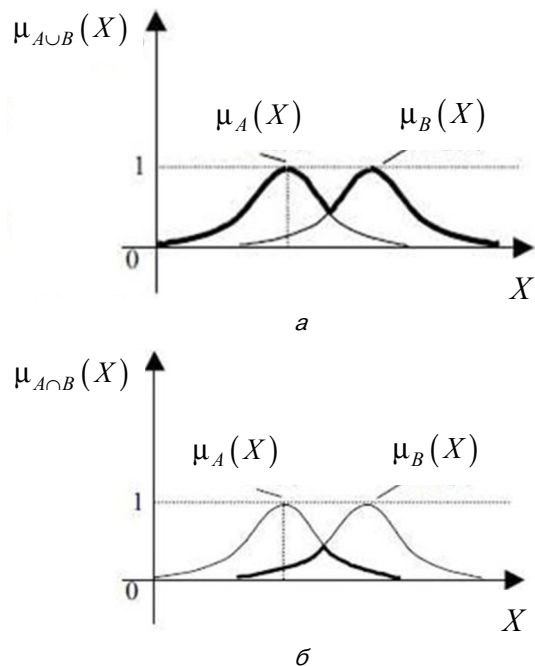


Рис. 2. Операции над нечеткими множествами:

a — объединение; *б* — пересечение

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 2. Operations on fuzzy sets:

a — union; *b* — intersection

Source: by A.A. Merkulov

Дефаззификация — функция преобразования нечеткого множества в точечное числовое значение. Далее приведены основные методы дефаззификации. Каждый из этих методов имеет свои особенности и применяется в различных сценариях в зависимости от задачи и требований на основе экспериментальных данных.

1. *Центр тяжести* (Center of Gravity, COG, Centroid): средневзвешенное значение всех элементов, принадлежащих нечеткому множеству. Вес каждого элемента равен его степени принадлежности.

2. *Метод максимина* (Max-Min Method) — выбирается элемент с наибольшей степенью принадлежности к нечеткому множеству. Дефаззифицированное значение будет равно этому элементу.

3. *Метод взвешенного среднего* (Weighted Average) — каждый элемент, принадлежащий нечеткому множеству, взвешивается в соответствии с его степенью принадлежности, затем эти взвешенные значения усредняются.

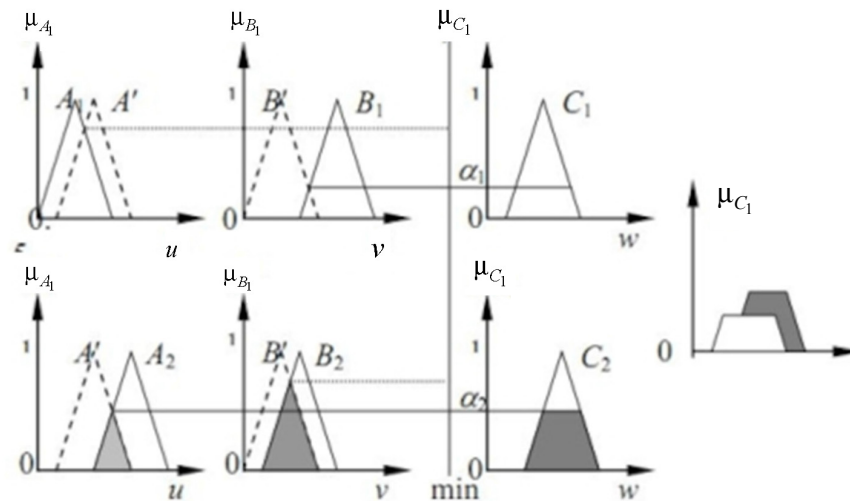


Рис. 3. Агрегация логического вывода методом Мамдани

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 3. Aggregation of logical inference by the Mamdani method

Source: by A.A. Merkulov

4. *Модифицированный метод центров сумм* (Modified Center of Sums, MCS) — взвешенное среднее значение всех элементов, при этом вес каждого элемента определяется как сумма степеней принадлежности всех элементов, которые больше данного элемента или равны ему.

5. *Метод усреднения максимальных значений* (Averaging the Maximum of Maximums, AMOM) — вычисляются средние значения элементов с максимальной степенью принадлежности на каждой итерации, дефаззифицированное значение является результатом последней итерации.

6. *Метод максимума из максимумов* (Largest of Maxima, LOM) — выбирается элемент с наибольшей степенью принадлежности во множестве. Дефаззифицированное значение будет равно этому элементу.

7. *Метод наименьшего из максимумов* (Smallest of Maxima, SOM) — выбирается элемент с наименьшей степенью принадлежности во множестве. Дефаззифицированное значение будет равно этому элементу.

8. *Метод бисекции* (Bisector method) — элемент, который делит нечеткое множество на две

равные части (дефаззифицированное значение находится точно в середине множества).

Выбор метода дефаззификации зависит от конкретной проблемной области, базы знаний экспертной системы и требований, предъявляемых к результатам нечеткого логического вывода (рис. 4).

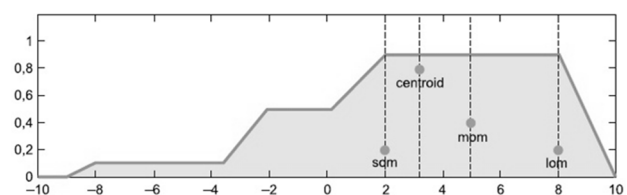


Рис. 4. Иллюстрация к методам приведения к четкости: som, centroid, mom, lom

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 4. Illustration of the methods of defuzzification: som, centroid, mom, lom

Source: by A.A. Merkulov

Одним из ключевых аспектов исследования является реконструкция функции поверхности отклика, которая проецирует гиперповерхность в n -мерное пространство, где n отражает количество лингвистических пере-

менных [7]. Пространство, в котором построена поверхность отклика, содержит числовые значения переменных (факторов). Поверхность отклика нечеткой экспертной системы является инструментом верификации и графическим представлением результатов функционирования модулей логического вывода [7; 8]. Данная поверхность — многомерный объект, для анализа которого целесообразно применять проекции. Визуализация трехмерных проекций поверхностей отклика позволяет определить взаимосвязь между входными переменными и результатами работы экспертной системы и выработать рекомендации по настройке функционирования, включая подбор методов дефаззификации, форм кривых функций принадлежности и других параметров. Применение и развитие инструментов нечеткой логики для решения актуальных задач строительной отрасли представлено в [9–12]. В [10; 13] рассматривается сравнительный анализ эффективности применения алгоритмов

нечеткой логики и искусственных нейронных сетей в строительстве для систем поддержки принятия решений.

Архитектура нечеткой экспертной системы поддержки принятия решений в строительной области включает базу знаний, которая представляет собой набор формализованных правил. На вход системы подаются четкие значения входных переменных, на выходе имеем дефаззифицированные значения рассчитанных нечетких переменных в виде их четких значений (рис. 5).

Экспертная система на входе и выходе оперирует числовыми значениями и позволяет формальным методом (без применения дифференциальных уравнений, основываясь на теории нечетких множеств) формализовать достаточно сложную взаимосвязь между концептами в той или иной специализированной предметной области определения инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству.



Рис. 5. Взаимосвязь основных функциональных блоков ЭС поддержки принятия решений
Источник: выполнено А.А. Меркуловым

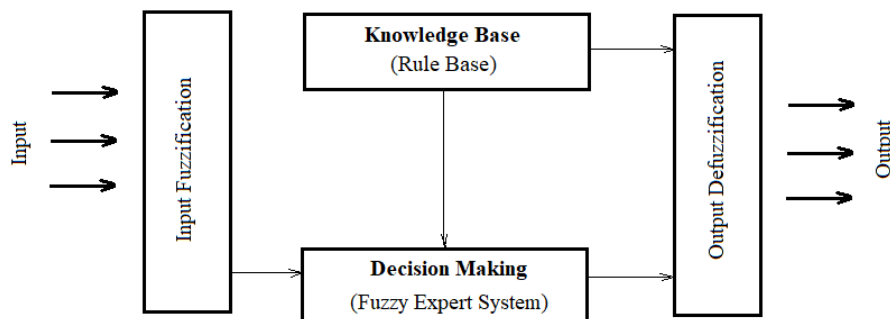


Figure 5. The relationship of the main functional blocks of the decision support system
Source: by A.A. Merkulov

2. Результаты и обсуждение экспериментальных исследований и оценка характеристик экспертной системы

В базе знаний были установлены логические взаимосвязи между входными и выходными переменными, что позволило осуществлять вывод и принимать обоснованные решения [14]. Экспериментальные исследования с расчетом характеристик БЗ необходимы для анализа и настройки экспертных функций, а также для дальнейшего развития и совершенствования разработанного инструментария. Созданная база знаний экспертной системы поддержки принятия инженерных решений в области строительства состоит из следующих модулей:

- ♦ ЭС для расчета количества лифтов в многоквартирных домах;
- ♦ ЭС для расчета инвестиционной привлекательности многоквартирных домов;
- ♦ ЭС для расчета этажности многоквартирных домов;
- ♦ ЭС для расчета ориентирования многоквартирных домов по параметрам инсоляции;
- ♦ ЭС для оценки технического состояния многоквартирных домов.

В ходе проведения данного исследования была разработана структура базы знаний, состоящая из отдельных модулей, каждый из которых отвечает за определенную проблемную область. Такая взаимосвязанная структура позволяет решать смежные инженерные задачи в различных областях подготовки многоквартирного дома к строительству. На основе разработанной структуры базы знаний, выбранных лингвистических переменных и их значений, а также входных и выходных переменных для каждой подсистемы логического вывода были определены и описаны все необходимые переменные.

В ходе исследования были подобраны функции принадлежности с учетом экспертных знаний о каждой предметной области. Каждая лингвистическая переменная проанализирована с целью определения диапазона ее значений и формы функций принадлежности для обоснованного логического вывода. Кроме того, разра-

ботаны входные и выходные переменные для каждой подсистемы логического вывода, что обеспечило передачу структурированной информации между различными модулями. Таким образом, функциональные возможности базы знаний позволили решать узкоспециализированные задачи в области строительства многоквартирных домов.

В результате проведения серии численных экспериментов и детального анализа различных проблемных областей строительства, связанных с посадкой здания и определением его технических и экономических показателей, была установлена логическая взаимосвязь, реконструированы поверхности отклика и определена зависимость между входными и выходными переменными в виде базы знаний экспертной системы. Методы дефазсификации подбирались для получения требуемых форм поверхностей отклика, описывающих соответствующие предметные области.

Математическая модель посадки жилых зданий на заданном земельном участке строительства представляет собой систему поддержки принятия решений при посадке застройки на земельный участок и включает подсистемы оценки количества этажей (многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для жилых районов, многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для кварталов, блокированные жилые дома для кварталов, блокированные жилые дома для жилых районов), а также систему ориентирования здания по параметрам инсоляции и географической широты строительного объекта. Учитывается поверхность отклика переменных «количество комнат», «географическая широта», «направление оси окна в секторах с азимутом».

Разработанная экспертная система предназначена для анализа различных градостроительных, проектных, продуктовых и других параметров земельного участка, рассматриваемого для приобретения под застройку. Система анализирует их и выдает параметры для графического моделирования посадки здания на данном участке через соответствующий блок экспертной системы. Посадка может изменяться в

зависимости от значений вводимых параметров: «высота здания», «количество квартир на этаже», «площадь квартир» и т. д. Систему можно использовать как для подбора вариантов зданий для конкретного земельного участка, так и для оценки соответствия выбранного здания градостроительным, проектным, продуктовым и прочим параметрам.

При расчете количества лифтов, комнат и этажей результирующий параметр округлялся до целого числа. Правильное количество лифтов способствует созданию благоприятной атмосферы в здании, повышению производительности труда и улучшению качества обслуживания жителей.

Один из расчетных модулей выдает значение инвестиционной привлекательности в миллионах рублей. Это значение может быть использовано как на этапе инвестиционной оценки потенциального земельного участка для застройщика, так и для оценки технико-экономических показателей будущего жилого комплекса.

Система принимает на вход параметры: «количество квартир в доме», «количество квартир на этаже», «площадь комнаты», «средняя площадь кухни», «высота потолков» (рис. 6).

Разработанная ЭС может быть расширена для анализа следующих параметров земельного участка: местоположения, размера, формы, рельефа, экологической обстановки, окружающих факторов и др. На основании этой информации расширенная система может предоставить графическую визуализацию посадки здания на заданном участке. Это поможет застройщику принять более обоснованное решение при выборе земельного участка для строительства жилого комплекса.

Количественные взаимосвязи между лингвистическими переменными обладают выраженным нелинейным характером, можно наблюдать локальные экстремумы функций (рис. 7). Это связано с параметрами кривых, которые задают функции принадлежности лингвистических переменных.

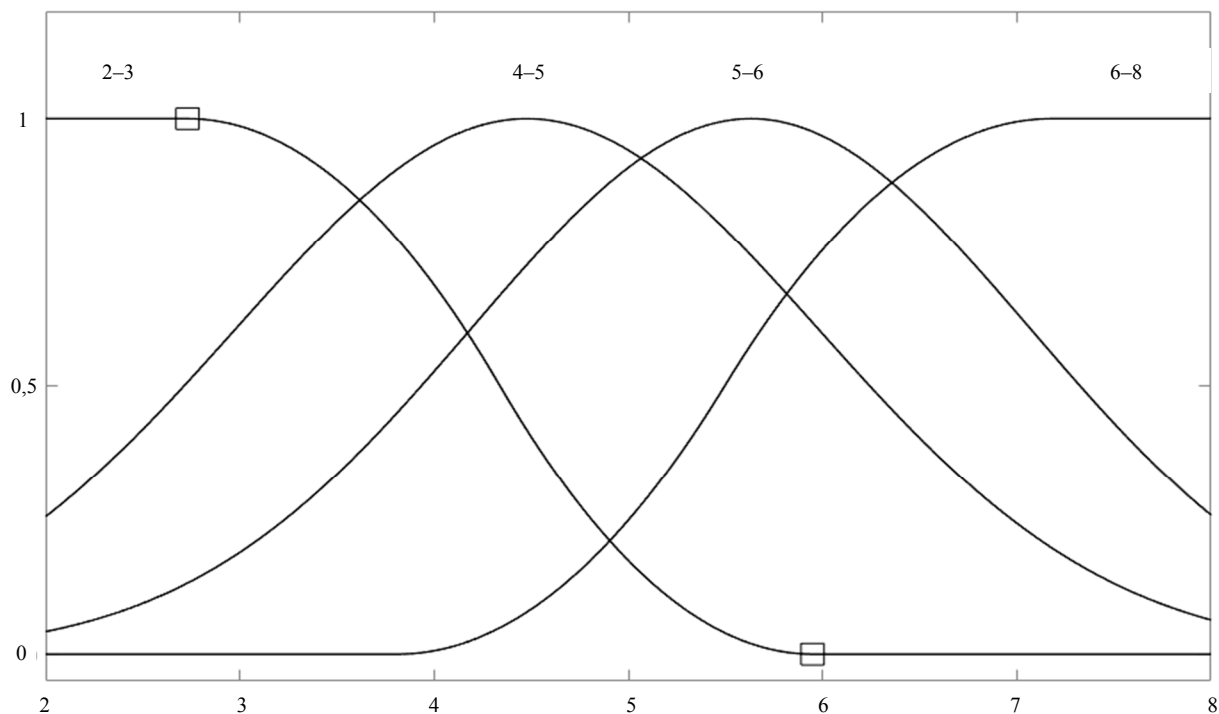


Рис. 6. Функции принадлежности входной лингвистической переменной «количество квартир на этаже», шт.
Источники: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 6. Membership functions of the output linguistic variable “number of apartments per floor”, pcs.
Source: by A.A. Merkulov

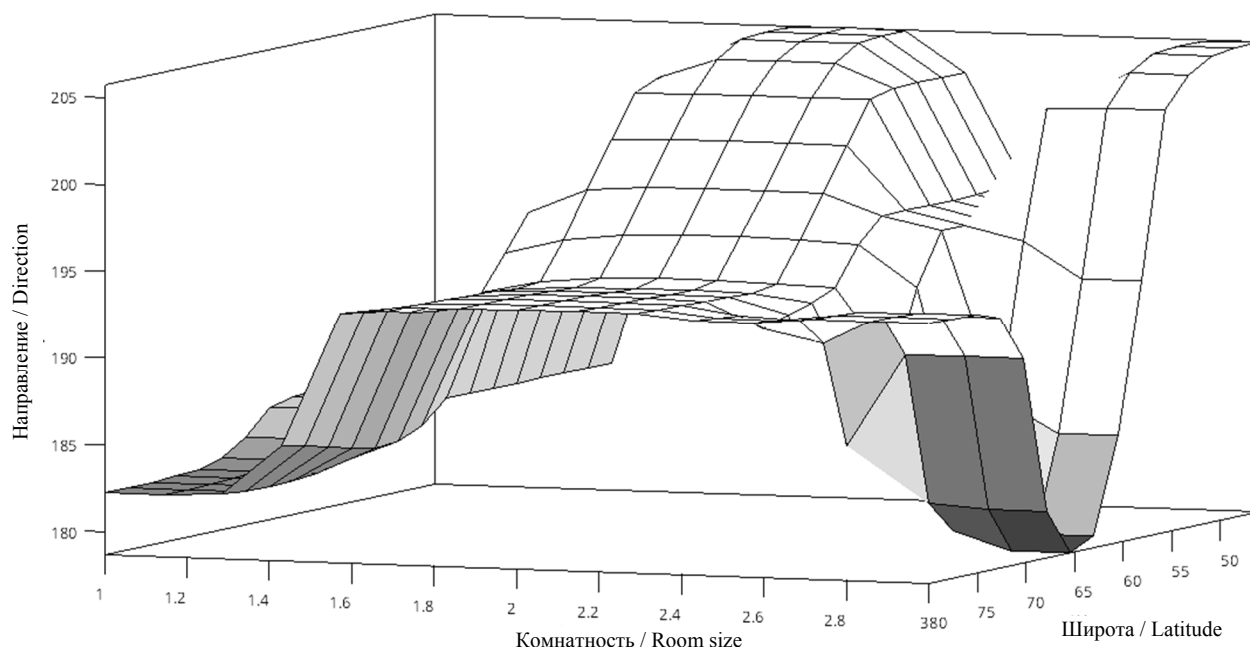


Рис. 7. Поверхность отклика переменных «комнатность», шт.; «широта», град.; «направление оси окна в секторах с азимутом», град.

Источники: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 7. Response surface of the variables “room size”, pcs.; “latitude”, deg.; “direction of the window axis in sectors with azimuth”, deg.

Source: by A.A. Merkulov

Данные экстремумы можно отнести к артефактам логического вывода, связанным с формой функций принадлежности. Следует отметить, что в разработанном прототипе не все локальные экстремумы поверхностей отклика полностью отразили специфику проблемной области, что свидетельствует о необходимости пополнения БЗ более точными правилами, отражающими экспертные знания.

При эквивалентном наборе правил в БЗ разработанная многомодульная архитектура ЭС является более выгодной по сравнению с одномодульной, где база знаний представляет собой единый набор правил для логического вывода, поскольку в многомодульном подходе каждый модуль имеет индивидуальный алгоритм дефаззификации. Таким образом, многомодульная архитектура БЗ позволяет более гибко подстраивать выходные значения под каждую проблемную область в сфере строительства.

В данной работе рассмотрены математические модели и методологические принципы,

которые в дальнейшем могут быть расширены с применением систем машинного обучения и нейронных сетей [15; 16] для решения задач по проектированию инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству, а также для решения смежных задач, частично рассмотренных в публикациях [17–19].

Заключение

Применение разработанной экспертной системы для определения инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству способствует повышению качества принимаемых решений, ускорению разработки и внедрению проектов, а также снижению материальных затрат. Методологической основой исследования служат теория нечетких множеств и алгоритмы нечеткого логического вывода.

В ходе проведенного исследования разработаны общие математические принципы опре-

деления инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству на основе экспертных методов и систем поддержки принятия решений. Приведены основные понятия из области нечеткой логики, включая лингвистические переменные и нечеткий логический вывод, операции с функциями принадлежности для систем нечеткого логического ввода. Рассмотрены алгоритмы дефазификации нечетких множеств для управления выводом нечеткой логической системы поддержки принятия решений в области строительства. Предложена схема интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области строительства на базе алгоритма Мамдани.

Список литературы / References

1. Caiado RGG, Scavarda LF, Gavião LO, Ivson P, Nascimento DL De M, Garza-Reyes JA. A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. *International Journal of Production Economics*. 2021;231:107883. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883> EDN: XZZKZY
2. Haririchian E, Lahmer T. Developing a hierarchical type-2 fuzzy logic model to improve rapid evaluation of earthquake hazard safety of existing buildings. *Structures*. 2020;28:1384–1399. <http://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.048> EDN: GJIYKQ
3. Lanbaran NM, Celik E, Yiğider M. Evaluation of investment opportunities with interval-valued fuzzy topsis method. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2020;5(1):461–474. <http://doi.org/10.2478/amns.2020.1.00044> EDN: QDEPPY
4. Kendal SL, Creen M. *An introduction to knowledge engineering*. Springer London, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-667-4>
5. Wang Y, Zhao Z, Guo J, Zou L, Ma L. A survey on control for Takagi-Sugeno fuzzy systems subject to engineering-oriented complexities. *Systems Science & Control Engineering*. 2021;9(1):334–349. <http://doi.org/10.1080/21642583.2021.1907259> EDN: BYNODY
6. Lucchese LV, de Oliveira GG, Pedrollo OC. Mamdani fuzzy inference systems and artificial neural networks for landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*. 2021;106(3):2381–2405. <http://doi.org/10.1007/s11069-021-04547-6> EDN: OITGPK
7. Azar AT. (ed.) *Fuzzy systems*. BoD — Books on Demand, 2010. ISBN: 9537619923
8. Jana DK, Pramanik S, Sahoo P, Mukherjee A. Interval type-2 fuzzy logic and its application to occupational safety risk performance in industries. *Soft Computing*. 2019;23:557–567. <http://doi.org/10.1007/s00500-017-2860-8> EDN: CRZKUJ
9. Kumar S, Anbanandam R. An integrated Delphi-fuzzy logic approach for measuring supply chain resilience: an illustrative case from manufacturing industry. *Measuring Business Excellence*. 2019;23(3):350–375. <http://doi.org/10.1108/MBE-01-2019-0001>
10. Al-Ani BRK, Erkan TE. A study of load demand forecasting models in electricity using artificial neural networks and fuzzy logic model. *International Journal of Engineering*. 2022;35(6):1111–1118. <http://doi.org/10.5829/ije.2022.35.06c.02> EDN: WOZLQP
11. Hendiani S, Bagherpour M. Developing an integrated index to assess social sustainability in construction industry using fuzzy logic. *Journal of cleaner production*. 2019;230:647–662. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.055>
12. Hedao N, Pawar A. Risk Assessment Model Based on Fuzzy Logic for Residential Buildings. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2021;29(4):37–48. <http://doi.org/10.2478/sjce-2021-0026> EDN: DQLKOL
13. Panchalingam R, Chan KC. A state-of-the-art review on artificial intelligence for Smart Buildings. *Intelligent Buildings International*. 2019;13(4):203–226. <http://doi.org/10.1080/17508975.2019.1613219> EDN: GVDBAU
14. Vilela M, Oluyemi G, Petrovski A. A fuzzy inference system applied to value of information assessment for oil and gas industry. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. 2019;2(2):1–18. <http://doi.org/10.31181/dmame1902001v> EDN: FBRMFE
15. Fayek AR. Fuzzy logic and fuzzy hybrid techniques for construction engineering and management. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020;146(7):04020064. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001854](http://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001854) EDN: AAFXLG
16. Jain A, Sharma A. Membership function formulation methods for fuzzy logic systems: A comprehensive review. *Journal of Critical Reviews*. 2020;7(19):8717–8733.
17. Pezeshki Z, Mazinani SM. Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey. *Artificial Intelligence Review*. 2019;52(1):495–525. <http://doi.org/10.1007/s10462-018-9630-6> EDN: BLPALL
18. Wang K, Ying Z, Goswami SS, Yin Y, Zhao Y. Investigating the Role of Artificial Intelligence Technologies in the Construction Industry Using a Delphi-ANP-TOPSIS Hybrid MCDM Concept under a Fuzzy Environment. *Sustainability*. 2023;15(15):11848. <http://doi.org/10.3390/su151511848> EDN: FSLOWM
19. Ren X, Li C, Ma X, Chen F, Wang H, Sharma A, Gaba GS, Masud M. Design of multi-information fusion based intelligent electrical fire detection system for green buildings. *Sustainability*. 2021;13(6):3405. <http://doi.org/10.3390/su13063405> EDN: JDNYAS

Сведения об авторах

Меркулов Александр Александрович, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0006-0211-808X; e-mail: amerkulov@levelgroup.ru

Степанян Иван Викторович, доктор биологических наук, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Российская Федерация, 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 5644-6735, ORCID: 0000-0003-3176-5279; e-mail: neurocomp.pro@gmail.com

About the authors

Alexander A. Merkulov, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-0211-808X; e-mail: amerkulov@levelgroup.ru

Ivan V. Stepanyan, Doctor of Biological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, 4 M. Kharitonyevskiy Pereulok, 101990, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5644-6735, ORCID: 0000-0003-3176-5279; e-mail: neurocomp.pro@gmail.com