

## НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА В УСЛОВИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

С.А. Ермаков, А.А. Болгов, А.Г. Чурсин

В работе рассматривается теория нечеткой логики на основе экспертных оценок. Проведен анализ теории нечетких множеств и сравнение с булевой логикой. Подробно изучены этапы фазификации, функций принадлежности, нечеткие правила, агрегация правил, дефазификация. Детально рассмотрены различные функции принадлежности применительно к теории нечетких множеств. Проанализированы приложения, в которых используется система нечеткой логики. Рассмотрены экспертные оценки, какими они бывают и от чего зависят. Выделены основные критерии для выбора эксперта из числа кандидатов. Выявлены особенности проведения собеседования с экспертами. Рассмотрены этапы получения экспертных оценок. Приведена сравнительная таблица методов сбора экспертных оценок. В заключении работы, сделан вывод о том, что система нечеткой логики на основе экспертной оценки является мощным инструментом в анализе рисков.

Ключевые слова: нечеткая логика, риск, количественная оценка, качественная оценка, функция принадлежности, безопасность.

### Введение

В последнее время наблюдается быстрый рост количества и разновидностей приложений, работающих с применением теории нечеткой логики. К таким приложениям и устройствам относятся стиральные машины, камеры с автофокусировкой, устройства управления электропитанием, авиационные двигатели, системы медицинской диагностики, приложения для обработки изображений и другие. Системы на базе теории нечеткой логики имитируют человеческое мышление и используют неточные (приблизительные) способы принятия решений.

Нечеткая логика – это метод решения задач, который реализуется аппаратно, программно или комбинацией этих средств. Нечеткая логика предоставляет простые

методы вывода заключений, которые основаны на неопределенности, неоднозначности, неточности или частично-потерянной входной информации. Более того, система нечеткой логики основывается на идее, что все величины в нашем окружении имеют непрерывную градацию. Температура, высота, скорость, расстояние и т.д., все это может быть определено с помощью определенной градации [1].

Нечеткая (многозначная) логика отличается от классической (булевой) логики тем, что она использует весь диапазон реальных чисел в интервале от 0 до 1, тогда как классическая логика работает только с двумя значениями 1 (истина) и 0 (ложь). Различия между классической и многозначной логикой показана на рис. 1.

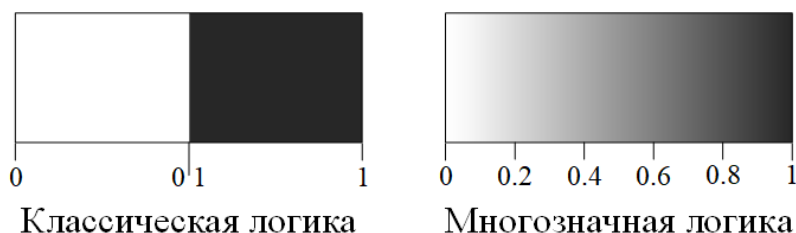


Рис. 1. Различия между классической (булевой) и многозначной логиками.

Теория нечетких множеств предлагает способ точного использования неточной и неопределенной информации, сформированной системой или человеческими суждениями. Если исходные данные не содержат подходящих числовых результатов, система нечеткой логики может решить эту проблему, используя лингвистические выражения, например, низкий, средний и высокий [2]. Реализация подхода нечеткой логики состоит из пяти этапов, как показано на рис. 2 [3, 4].

1. Фазификация: это процесс конвертирования четких (классических) данных в нечеткие переменные, используя лингвистические выражения.

2. Функция принадлежности (ФП): включает в себя сопоставление каждой переменной со значением от 0 до 1. Эти

значения называются степенью принадлежности.

3. Правила нечеткого вывода: показывает отношение между входными и выходными лингвистическими выражениями, используя правило ЕСЛИ-ТО, чтобы получить выходные данные.

4. Агрегация правил: объединяет нечеткие множества, которые представляют вывод каждого правила в единое нечеткое множество.

5. Дефазификация: это процесс конвертации нечеткого вывода в четкий (классический) вывод. Так как нечеткий вывод является лингвистической переменной, то эту переменную необходимо преобразовать в четкий вывод, с помощью процесса дефазификации.



Рис. 2. Представление подхода нечеткой логики

### Фазификация

Первым шагом в применении подхода нечеткой логики является фазификация. Большинство существующих переменных в реальном мире являются классическими переменными или четкими. Сначала нужно конвертировать эти четкие переменные, а затем для обработки этих данных применить нечеткий вывод, чтобы получить желаемый результат [3]. Входные и выходные лингвистические переменные представляются нечеткими множествами. Нечеткие множества — это множества содержащие элементы с различной степенью принадлежности к этим множествам. Идея нечетких множеств противоположна четким (классическим) множествам, потому что

четкие переменные не принадлежат множеству, если их принадлежность к этому множеству не полная. Тогда как, в нечетких множествах, принадлежность элементов к множеству может быть не полной, а также они могут принадлежать другим нечетким множествам в той же степени [4, 5].

Разница между классической и нечеткой логикой показана на рис. 3. Решение в области классической логики может иметь только два возможных значения: маленький или большой. В то время как в теории нечетких множеств решения могут иметь большое (возможно бесконечное) количество значений. Поэтому, нечеткие множества решают проблему неопределенных лингвистических переменных [6].

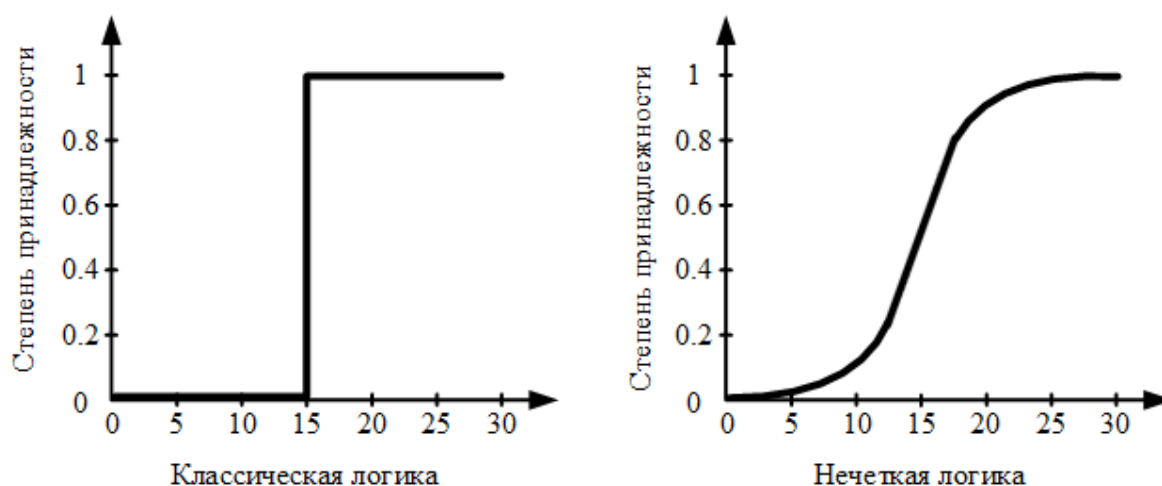


Рис. 3. Различия между классической и нечеткой логикой

### Функция принадлежности

Обычно, фазификация включает два процесса: получение ФП для входных и выходных переменных и сопоставление их с соответствующими лингвистическими переменными [7].

Лингвистические переменные – строительные блоки системы нечеткой логики. Они представляют собой переменные, которые определены словами или словосочетаниями [7]. Например, лингвистические переменные, описывающие температуру, могут быть определены как холодно, горячо и очень горячо.

Нечеткая ФП – это кривая, которая определяет, как каждая точка во входном пространстве сопоставляется с степенью принадлежности в диапазоне от 0 до 1. Входное пространство иногда называется областью рассуждений. Единственное условие, которому ФП должна удовлетворять, это то, что она должна варьироваться в промежутке от 0 до 1 [5]. В нечеткой логике применяются различные типы ФП: треугольные, трапециевидные, гауссовы и другие. Выбор подходящей ФП зависит от выбранного приложения или системы. Для систем, которые обладают динамическими изменениями за короткий промежуток времени, должна быть

использована треугольная или трапециевидная ФП. Для тех систем, которым требуется очень высокая точность управления, следует выбирать гауссовы или S-образные ФП [4, 8].

На практике, ФП для нечеткого множества «А» в области дискурса «X» определяется как  $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ , где каждый элемент «X» соотносится со значением в промежутке от 0 до 1. Это значение называется значением принадлежности или степенью принадлежности, которые количественно определяют степень принадлежности элемента «X» к нечеткому множеству «А». ФП позволяют нам графически представлять нечеткое множество. Ось X представляет область дискурса, а ось Y представляет степень принадлежности в интервале [0,1] [9].

### Треугольная ФП

Треугольная ФП – это функция треугольной формы, которая используется для определения отношения между входными данными перед фазификацией и фазифицированными выходными данными. Она представлена нижним пределом «а», верхним пределом «b» и значением «m», где  $a < m < b$  [9]. Треугольная функция и её представление показаны на рис. 4.

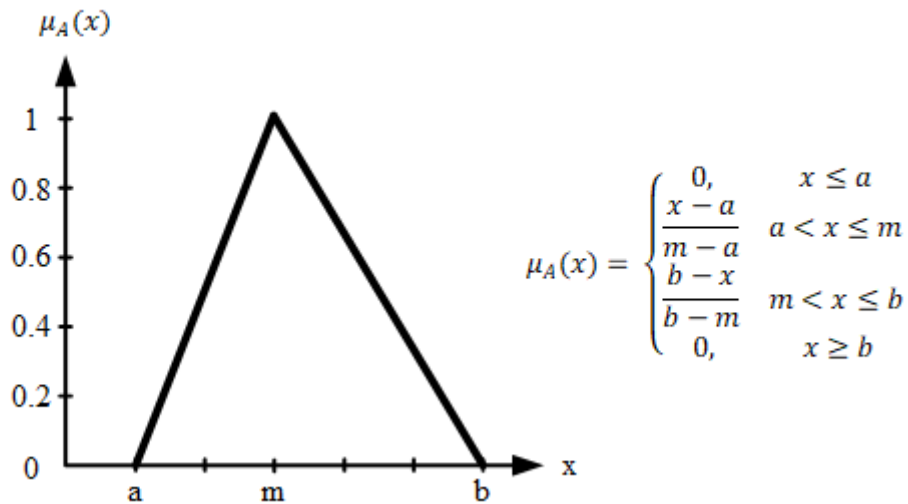


Рис. 4. Функция и представление треугольной ФП

Существует два типа треугольных ФП; симметричные и асимметричные. Единственное отличие между симметричной

и асимметричной ФП, показано на рис. 5. Значение «m» в симметричной ФП делит ее на две равные половины.

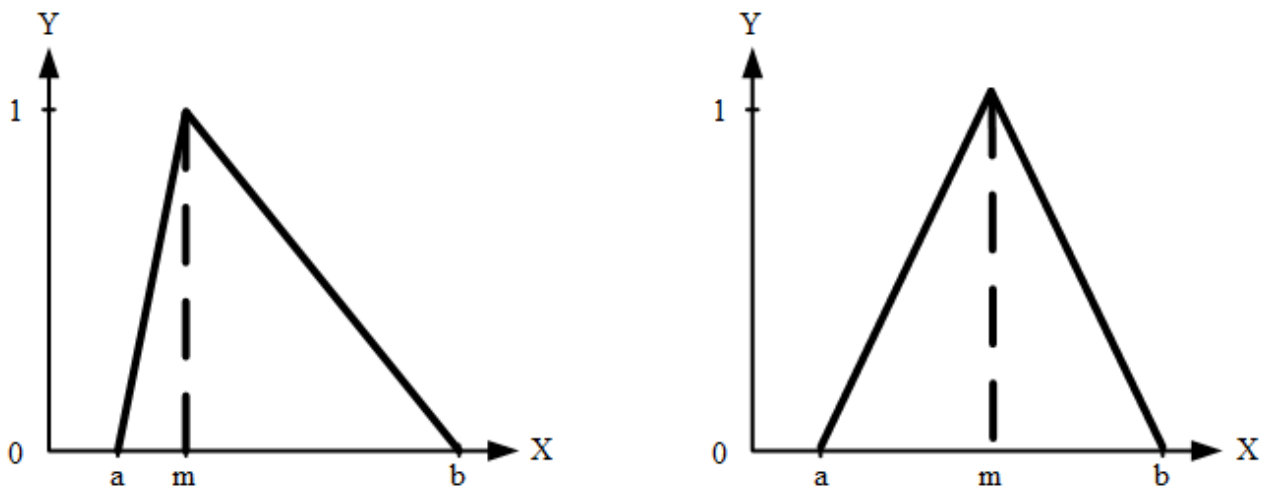


Рис. 5. Различие между ассиметричной и симметричной треугольной ФП

### Трапециевидная ФП

Трапециевидная ФП – это функция трапециевидной формы, которая представлена нижним пределом «a», верхним пределом «d», нижним вспомогательным

пределом «b», и верхним вспомогательным пределом поддержки «c», где  $a < b < c < d$  [13]. Трапециевидная функция и её представление показаны на рис. 6.

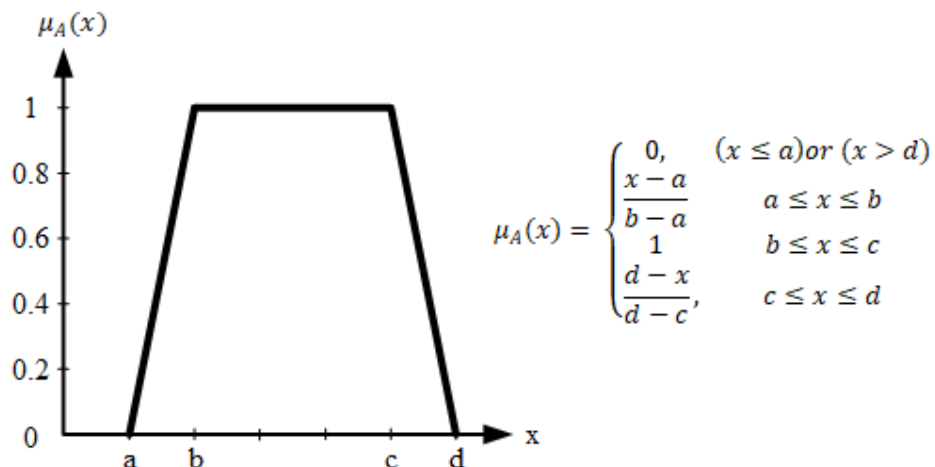


Рис. 6. Функция и представление трапецевидной ФП

### Гауссова ФП

Гауссова ФП – это функция кривой гаусса, которая представлена центральным/средним значением «m» и среднеквадратичным отклонением  $k > 0$ . Чем

меньше «k», тем уже «колокол» [10]. Представление и описание функция гаусса, где «k» и «m» представляют среднеквадратичное отклонение и среднее значение соответственно, показано на рис. 7.

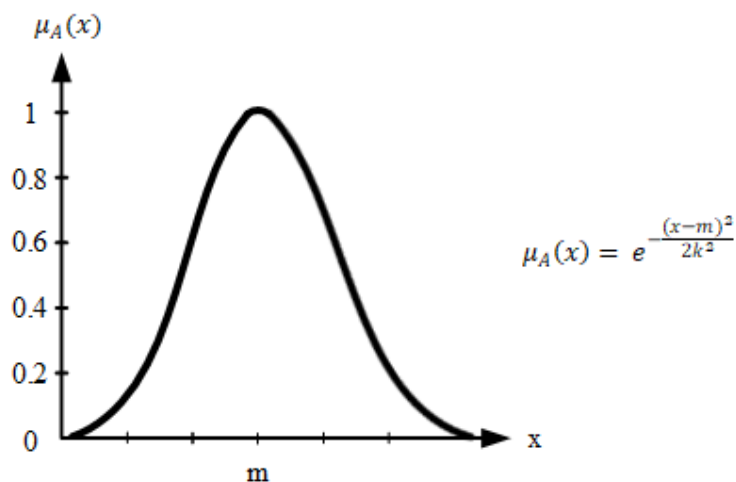


Рис. 7. Функция и представление гауссовой ФП

### Двойная гауссова ФП

Двойная гауссова ФП – это функция, которая включает в себя комбинацию из функций Гаусса. С помощью этой функции определяется отношения между входными данными перед фазификацией и выходом после фазификации. Нормальная гауссова ФП представлена с помощью двух параметров (sig, c). При этом двойная

гауссова ФП представлена с использованием комбинации двух пар этих параметров. Первая функция, заданная sig1 и c1, определяет форму самой левой кривой, а вторая функция, заданная sig2 и c2 определяет форму самой правой кривой. Каждый раз, когда  $c1 < c2$ , комбинированная ФП достигает максимальное значение [10]. В гауссовой ФП «σ» представляет

среднеквадратичное отклонение, а «с» – среднее значение. Двойная гауссова ФП и ее представление, показано на рис. 8.

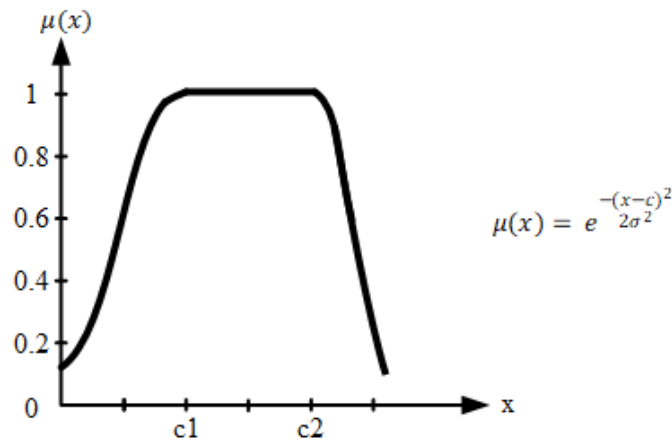


Рис. 8. Функция и представление двойной гауссовой ФП

**Обобщенная колоколообразная ФП**

Обобщенная колоколообразная ФП зависит от параметров «а», «b» и «с», где параметр «а» определяет коэффициент крутизны наклона левой и правой частей кривой, параметр «b» является

положительным, т.к. он определяет ширину верхней части функции, а параметр «с» определяет центр кривой [10]. График обобщенной колоколообразной ФП и ее представление показаны на рис. 9.

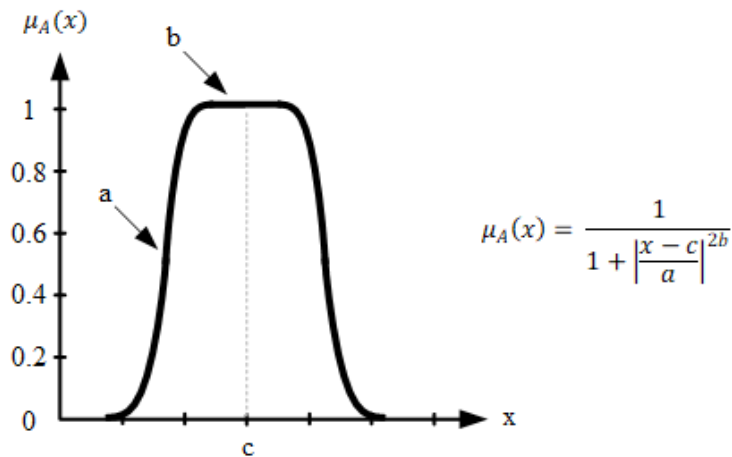


Рис. 9. Функция и представление обобщенной колоколообразной ФП

**Сигмоидная ФП**

Сигмоидная ФП – это функция сигмоидной формы, зависящая от параметров «а» и «с», где параметр «а» определяет коэффициент крутизны кривой, а параметр «с» симметрично делит кривую по центру.

Обычно сигмоидная ФП по своей сути открыта справа или слева, и поэтому она подходит для описания таких понятий, как «очень большой» или «очень маленький» [10]. График сигмоидной ФП и ее представление показаны на рис. 10.

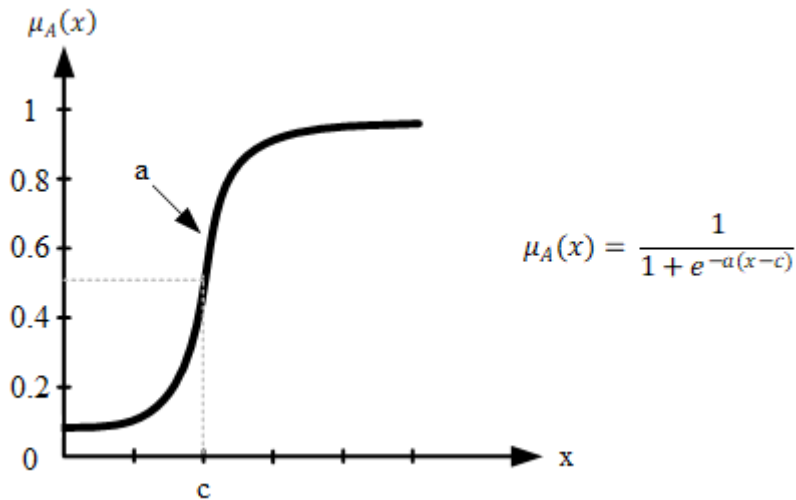


Рис. 10. Функция и представление сигмоидной ФП

### Двойная сигмоидная ФП

Двойная сигмоидная ФП – это функция, которая описывается разностью двух сигмовидных функций. Она зависит от четырех параметров «a1», «c1», «a2» и «c2». При этом «a1» и «a2» определяют коэффициенты крутизны кривых слева и

справа, а параметры «c1» и «c2» симметрично делят кривые по центру. Сама двойная ФП определяется разностью двух сигмоидных функций «F1(x; a1, c1) – F1(x; a2, c2)» [10]. Функция разницы между двумя сигмоидными ФП и ее представление показаны на рис. 11.

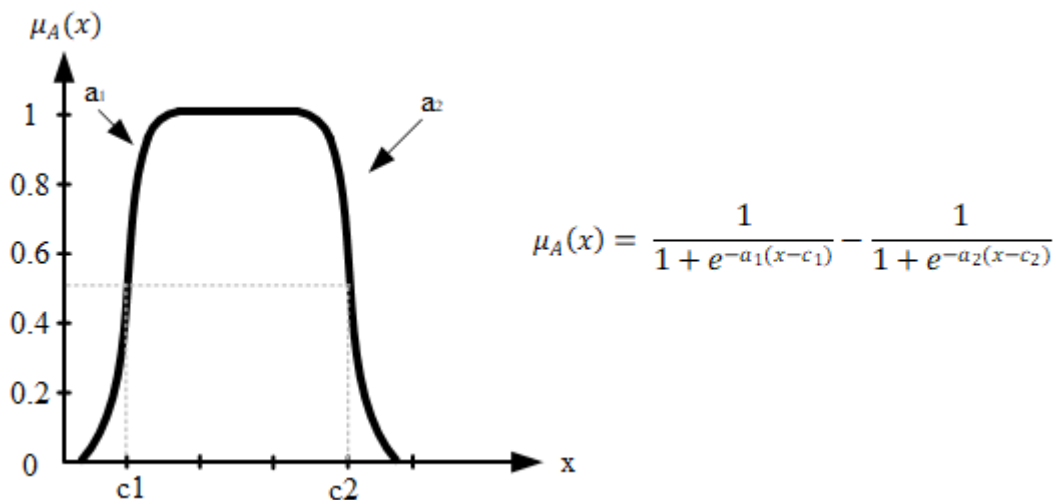


Рис. 11. Функция и представление разницы между двумя сигмоидными ФП

### Произведение двух сигмоидных ФП

Произведение двух сигмоидных ФП – это функция, которая используется для представления произведения двух сигмоидных ФП. Подобно разнице между двумя сигмоидными ФП, она зависит от

четырех параметров «a1», «c1», «a2» и «c2» и является произведением двух этих сигмоидных функций таким образом, что «F1(x; a1, c1) × F2(x; a2, c2)». Функция произведения двух сигмоидных ФП и ее представление показаны на рис. 12.

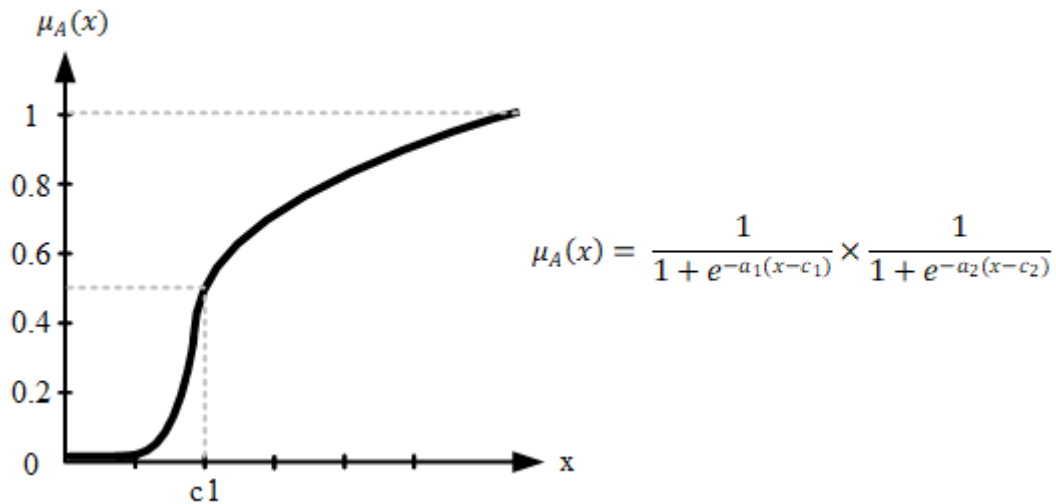


Рис. 12. Функция и представление произведения двух сигмоидных ФП

### S-образная ФП

S-образная ФП – это s-образная функция, представляющая отображение на вектор  $x$ . Она зависит от двух параметров « $a$ » и « $b$ » которые определяют крайние точки наклонной части кривой, другими словами,

эти точки определяют переход функции в отличное от 0 значение и переход функции в значение 1 соответственно. Функция S-образной ФП и ее представление показаны на рис. 13.

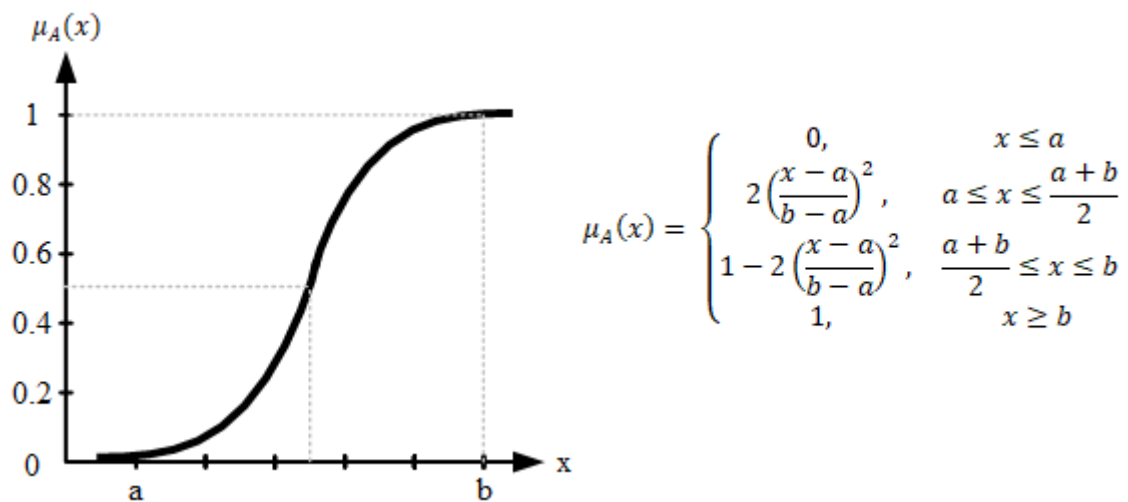


Рис. 13. Функция и представление S-образной ФП

### Z-образная ФП

Z-образная ФП – это z-образная функция, которая используется для представления взаимосвязи между входными данными для фазификации выходными данными после фазификации. Это функция  $x$  основанная на

сплайне названа так из-за своей Z-образности. Параметры « $a$ » и « $b$ » отображают экстремумы наклонной части кривой. Функция Z-образной ФП и ее представление показаны на рис. 14.



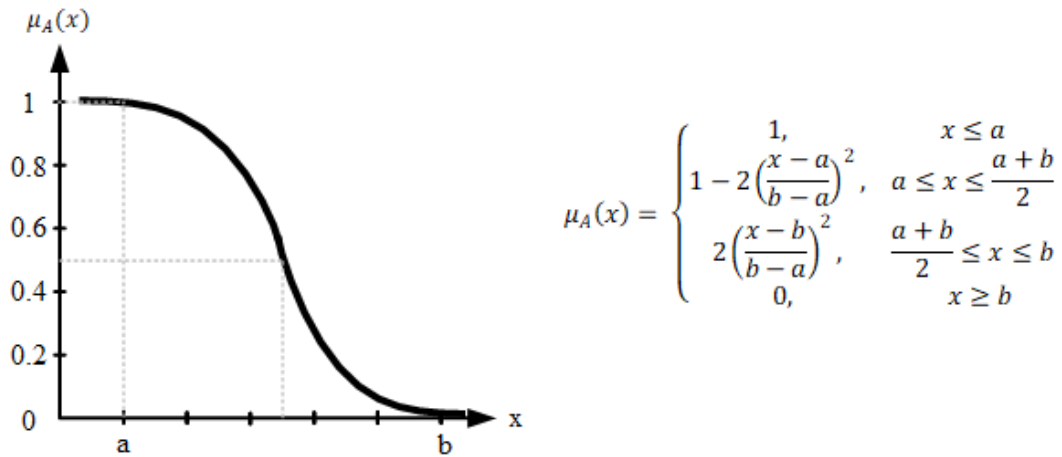


Рис. 14. Функция и представление Z-образной ФП

**Пи-образная ФП**

Пи-образная ФП – это кривая на основе сплайна названа так из-за ее Пи формы. Эта ФП оценена в точках, определенных

вектором  $x$ . Пи-образная ФП является произведение S-образной и Z-образной ФП. Функция Пи-образной ФП и ее представление показаны на рис. 15.

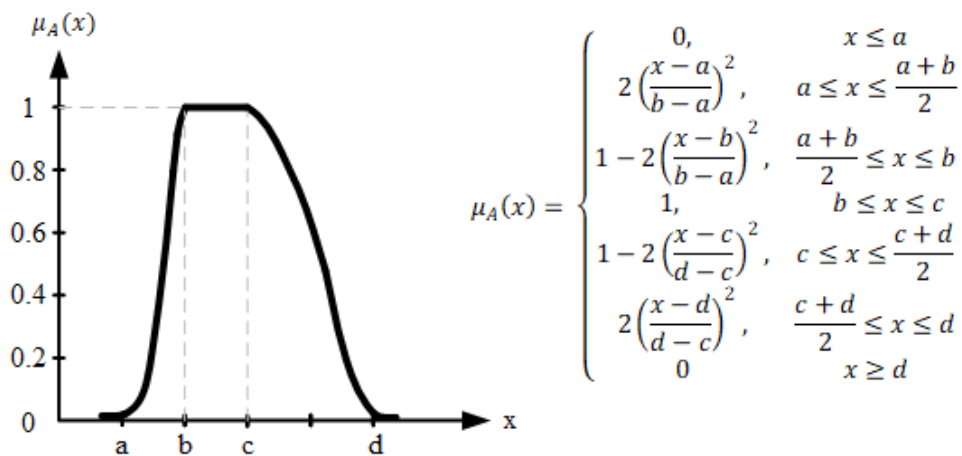


Рис. 15. Функция и представление Пи-образной ФП

**Нечеткие правила**

Правила нечеткого вывода рассматриваются как база знаний, описывающая взаимосвязь между входными и выходными лингвистическими выражениями. Они представлены последовательностью условий «ЕСЛИ-ТО». Это приводит к набору процедур, которые определяют, какие действия или выводы должны быть предприняты в данный момент времени при появлении входных комбинаций. Нечеткие правила создаются на

основе знаний или опыта, относительно выбранного приложения [8].

Нечеткое условие «ЕСЛИ-ТО» использует лингвистические переменные для описания связи между определенным условием и заключением. Часть «ЕСЛИ» в основном используется для определения условия, а часть «ТО» используется для определения заключения или вывода в виде лингвистической переменной. Эти «ЕСЛИ-ТО» правила обычно используются в подходе нечеткой логики для определения степени соответствия входных данных условию

правил [8]. Нечеткое правило представлено в следующей форме:

$$\text{ЕСЛИ } X \Rightarrow A, \text{ ТО } Y \Rightarrow B, \quad (1)$$

где  $X$  и  $Y$  – лингвистические переменные, а  $A$  и  $B$  – лингвистические значения, определяемые нечеткими множествами в области дискурса  $X$  и  $Y$  соответственно.

Для создания нечетких выходных правил, нужно определить тип системы нечеткого вывода (FIS). Существует два типа FIS: Мамдани и Сугено. FIS Мамдани чаще используется для метода нечеткого вывода. Этот подход был предложен в 1975 году для управления логикой парового двигателя и котла [11]. В FIS Мамдани был задан набор нечетких правил, предоставленных опытными операторами. FIS Мамдани выполняется в 4 шага: фазификация нечетких

переменных, оценка правил, агрегация выходных правил и дефазификация [12].

FIS Сугено был впервые представлен в 1985 [12]. Он очень похож на метод Мамдани. Вместо нечеткого множества, FIS Сугено использует математическую функцию для определения выходной переменной. FIS Сугено основывается на генерации нечетких правил через заданный набор данных входа-выхода [12]. Главное отличие FIS Сугено от FIS Мамдани заключается в последовательном использовании нечетких правил. Формат нечетких правил Сугено представлен следующим образом:

$$\text{ЕСЛИ } X \Rightarrow A, \text{ И } Y \Rightarrow B, \text{ ТО } Z \Rightarrow F(X, Y), \quad (2)$$

где  $X, Y, Z$  – лингвистические переменные;  $A$  и  $B$  – лингвистические значения, определяемые нечеткими множествами в области дискурса  $X$  и  $Y$  соответственно;  $F(X, Y)$  – это математическая функция выходной переменной.

Одним из важных фактов, на который следует обратить внимание в отношении обоих FIS, является то, что FIS Сугено не может быть использован, если не существует определенного набора данных ввода-вывода. Поскольку большинство процессов оценки риска страдает от нехватки надлежащих наборов данных, характеризующих риск, FIS Мамдани является наиболее часто используемым методом нечеткого вывода в процедурах оценки риска.

### Агрегация правил

Агрегация правил – это процесс, который используется для объединения нечетких множеств с выхода каждого правила в единое нечеткое множество. Агрегация правил

используется однократно для каждой переменной с выхода правил перед последним шагом дефазификации. Агрегация правил является одним из основных этапов в FIS Мамдани. Это связано с тем, что нечеткий вывод зависит от оценки всех нечетких правил в FIS и, следовательно, все правила должны быть объединены, для получения конечного результата нечеткого вывода.

Входные данные процесса агрегации – это список усеченных выходных функций, возвращаемых процессом вывода для каждого правила. Результатом процесса агрегирования является одно нечеткое множество для каждой выходной переменной [10]. Большинство процессов агрегации являются коммутативными, поэтому порядок выполнения правил не важен. Рис. 16 показывает, как нечеткие правила объединяются в три нечетких множества, а затем, как выходы каждого правила агрегируются в одно нечеткое множество с использованием максимального метода.

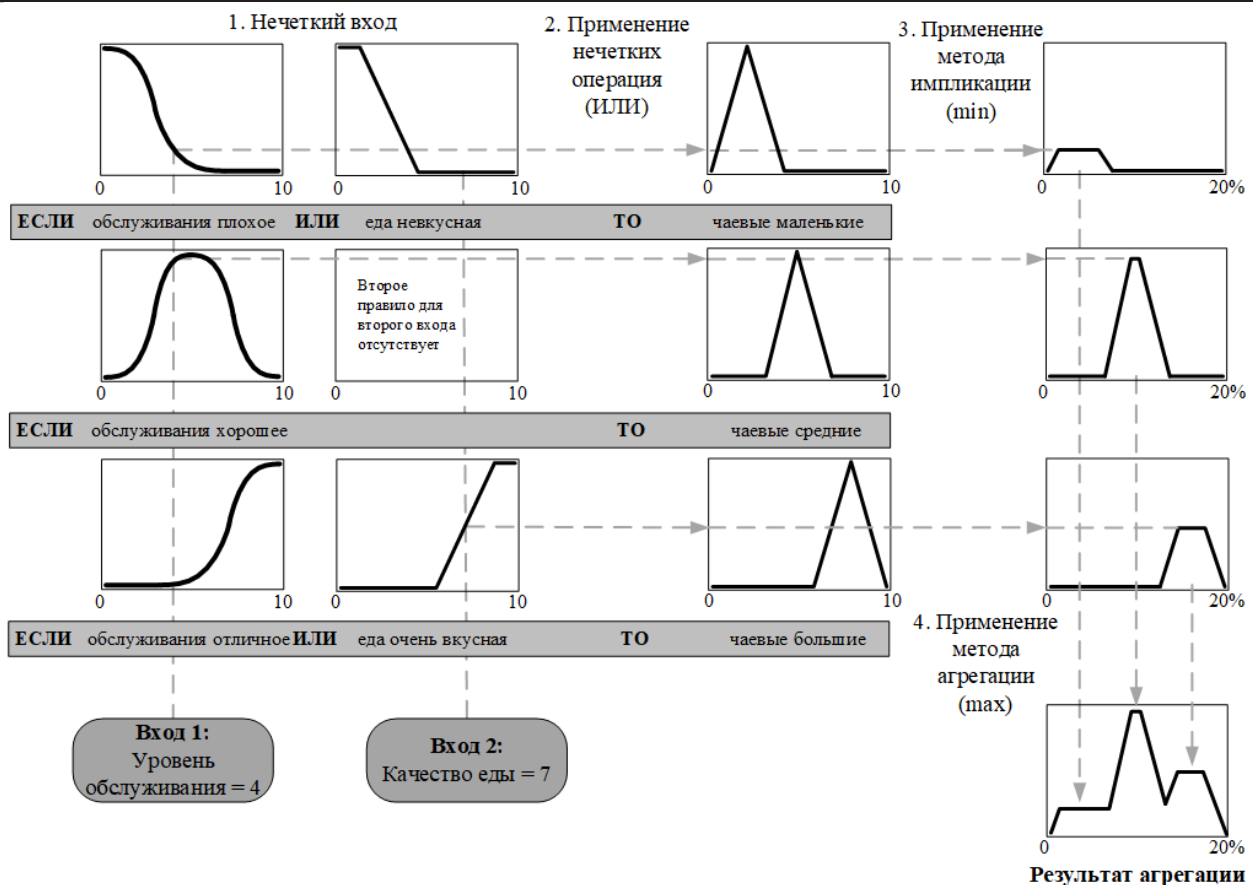


Рис. 16. Агрегация нечетких правил с максимальным методом

### Дефазификация

Дефазификация – это последний шаг в построении системы нечеткой логики. В основном, дефазификация – процесс отображения определенных данных из пространства нечеткой логики, в пространство четкой логики. Другими словами, процесс дефазификации используется для преобразования нечеткого выхода обратно к четкому (классическому) выходу. Так как нечеткий вывод остается лингвистической переменной, то его необходимо преобразовать в четкую переменную [3, 4].

Существует пять основных методов дефазификации которые могут быть реализованы с использованием MATLAB. Эти методы включают в себя:

1. Метод среднего максимума: он работает через вычисление среднего значения нечетких выходных данных, которые имеют наивысшую степень принадлежности. Этот метод не работает на всей выходной функции принадлежности, а лишь только с точками,

которые имеют наивысшую степень принадлежности к этой функции. Для функций принадлежности, которые имеют разные формы, но одинаковую высшую степень принадлежности, этот метод предоставит один и тот же результат [4, 5].

2. Центроида: это наиболее распространенный метод дефазификации, который широко применяется в многих приложениях. Его так же называют методом центроиды. Этот метод подобен принципу вычисления центра тяжести в физике. В нем вычисляется средневзвешенное значение функции принадлежности или другими словами – центр тяжести области, ограниченной кривой. Это и будет четким значением нечеткой величины [4, 5].

3. Биссектриса области: биссектриса – это вертикальная линия, которая делит область на две подобласти, при этом равной площади. Иногда, но не всегда совпадает с центральной линией.

4. Наименьшее из максимального значения: определяет наименьшее из

максимальных значений площади под кривой агрегированных функций принадлежности [13].

5. Наибольшее из максимального значения: определяет наибольшее из максимальных значений площади под кривой агрегированных функций принадлежности [13].

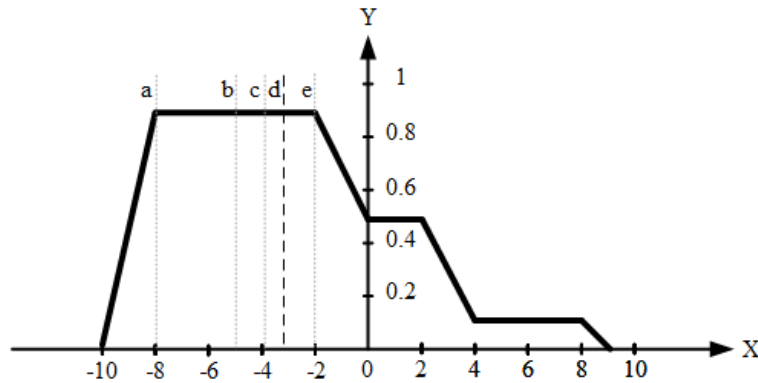


Рис. 17. Пример, показывающий вычисление дефазифицированного значения, используя наибольшее из максимального (a), метод среднего максимума (b), биссектрисы (c), центроиды (d), наименьшее из максимального (e).

### Приложения системы нечеткой логики

Есть множество приложений в различных аспектах промышленного производства или мануфактуры, в которых используется система нечеткой логики. Система нечеткой логики является эффективным инструментом, помогающим принимать решения при реинжиниринге производства, оптимизации параметров процесса бурения, реализовывать лучшее планирование пакетной обработки и т.д. [14].

Существует немало приложений, работающих на системе нечеткой логики.

- Аэрокосмическая промышленность: контроль высоты космического корабля, контроль высоты спутника;
- Автомобильная промышленность: интеллектуальные дорожные системы, управление дорожным движением, алгоритмы работы автоматической коробки переключения передач;
- Бизнес: система поддержки принятия решений, оценка персонала в больших компаниях;
- Оборонная промышленность: обнаружение подводных целей, управление сверхзвуковым перехватчиком, военно-

морские средства поддержки принятия решений;

• Электроника: таймер стиральной машины, микроволновые печи, пылесосы, кондиционеры;

• Финансы: прогнозы на фондовом рынке, управление фондами, контроль за переводом денежных средств;

• Морское дело: автопилот для судов, выбор оптимального маршрута, управление судами;

• Здравоохранение: поддержка медицинских диагностических систем, многовариантный контроль анестезии, диагнозы рентгенологии;

• Безопасность: системы принятия решений для безопасной торговли ценными бумагами, различные устройства безопасности;

• Транспорт: контроль расписания движения поездов, ускорение движения поездов, автоматическая работа поезда метро;

• Обработка изображений: распознавание образов и их классификация, распознавание рукописи;

- Психология: анализ поведения человека, расследование и предотвращение криминальных случаев.

### Экспертная оценка

При отсутствии достаточного количества практических данных и неопределенных переменных, модели могут быть рассчитаны с использованием экспертной оценки. Эксперт – это квалифицированное лицо со специальными знаниями, навыками и с опытом работы в конкретной области [15]. Экспертные оценки являются выражением умозаключений, которые основаны на знаниях и опыте. Они часто используются для оценки неопределенных параметров в вероятностной форме [16].

Экспертные оценки могут быть качественными или количественными. Количественные оценки могут быть выражены как числовые значения вероятности, рейтинги, шансы, оценки неопределенности и весовые коэффициенты. В то время как качественные оценки могут быть представлены в виде текстового описания определенных сценариев и их оценки [16]. Экспертные оценки используются для помощи в принятии решений во многих областях, таких как финансовое прогнозирование и оценка рисков террористических атак в сфере национальной безопасности. Использование экспертных оценок вызывает вопросы, связанные с точностью полученных результатов. Однако, во многих ситуациях оценка экспертов – это единственный источник точной информации относительно определенных сценариев [17].

Экспертная оценка – это мощный инструмент при анализе рисков. Неопределенность, которая окружает меру вероятности в анализе рисков, очень трудно вычислить для редких и непредсказуемых событий. Это то же самое, что пытаться оценить риск безопасности будущих неизвестных событий [18].

### Выбор подходящего эксперта

Процесс выбора экспертов является одним из важных этапов при получении

экспертной оценки. Этот процесс требует разработки некоторых критериев, по которым можно было бы оценить экспертные знания [17]. Эти критерии могут быть такими:

- Исследования в смежной области, подтвержденные публикациями и грантами;
- Ссылки на проделанные ранее работы;
- Степени, награды и другие документы, подтверждающие квалификацию эксперта;
- Желание и готовность участвовать;
- Рекомендации и отзывы от высшего руководства, различных органов и высокопоставленных лиц;
- Занимаемые должности;
- Членство или назначение в наблюдательные советы, комиссии и т.д.

### Опрос эксперта

Экспертную оценку можно получить с использованием различных методов. Один из наиболее распространенных методов – это опрос. Опрос представляет из себя беседу между двумя людьми, потенциальным экспертом и опрашивающим. Экспертам дается набор заранее определенных вопросов, независимо от того, используют они качественные или количественные методы оценки. Вопросы могут быть связаны с оценкой модели, предложениями о некоторых моментах, связанных с исследованием или различными аспектами области рассмотрения. Есть два способа проведения опроса: структурированный и полуструктурированный [17]. Структурированный опрос обычно используют для получения конкретных знаний о предмете, где опрашивающий задает серию заранее подготовленных вопросов. Полуструктурированный опрос включает набор заранее подготовленных открытых и закрытых вопросов. Также в полуструктурированном опросе в ходе диалога могут формулироваться дополнительные вопросы, чтобы детально объяснить суть проблемы и идеи. Несмотря на то, что можно столкнуться с трудностями в поиске экспертов, опрос является гибким методом, который используется для того, чтобы получить более детальную информацию в определенной области исследования [17].

**Этапы экспертной оценки** экспертных оценок [18], как показано на рис. 18. Независимо от типа экспертной оценки, существуют основные этапы получения

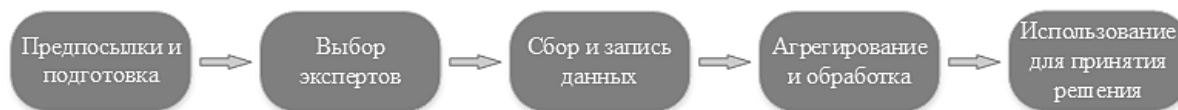


Рис. 18. Этапы получения экспертных оценок

Первый этап – это предпосылки и подготовка. Необходимость в получении экспертных оценок зависит от конкретных ситуаций. Однако, главная цель использования экспертных оценок должна быть четко определена. Эксперт должен быть полностью подготовлен и понимать необходимые вопросы и предпосылки, на которые необходимо ответить в ходе исследования.

Следующим этапом является выбор подходящих экспертов для проведения этапа экспертной оценки в соответствии с

критериями, рассмотренными в выше. Следующим логическим этапом после выбора экспертов является запись их ответов с использованием диктофона или ручной записи. Есть три различных способа сбора экспертных оценок: индивидуальный, интерактивная группа, или Дельфи [18], которые представлены в табл. 1. Собранные данные обрабатываются и анализируются, для извлечения наиболее значимых результатов исследования, чтобы в дальнейшем их можно было использовать в операциях принятия решений.

Таблица 1

Методы сбора экспертных оценок

Метод сбора данных	Функции
Индивидуальный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Лучший метод для получения детальной информации;</li> <li>– Помогает избежать потенциальной предвзятости из-за групповой динамики;</li> <li>– Легко обрабатывать и анализировать полученные данные;</li> <li>– Накладывает ограничения сотрудничества экспертов;</li> <li>– Требуется достаточно большого количества времени.</li> </ul>
Интерактивная группа	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Генерирует более точные данные, особенно для прогнозов;</li> <li>– Подходит для решения задач, требующих оригинальности и проницательности;</li> <li>– Больше подходит для сложных режимов реагирования, из-за большого количества участников;</li> <li>– Возможна предвзятость к групповому мышлению;</li> <li>– Сложность подготовки, администрирования и логистики;</li> <li>– Требуется хорошо подготовленный модератор, особенно, если в группе больше семи экспертов.</li> </ul>
Дельфи	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Эксперты индивидуально составляют прогноз по определенной теме;</li> <li>– Исследователь объединяет все точки зрения и делится результатами с участвующими экспертами;</li> <li>– На основании полученных результатов, от экспертов требуют обновить их прогнозы;</li> <li>– Результатом данного метода является согласованный прогноз от каждого эксперта;</li> <li>– Предвзятость между экспертами ограничена;</li> <li>– Требуется достаточно большого количества времени.</li> </ul>

### Заключение

В заключении, можно сделать вывод о том, что система нечеткой логики на основе экспертной оценки является мощным инструментом для анализа рисков, так как эта система позволяет оценить риск в условиях неопределенности, характерных для показателя вероятности наступления ущерба при анализе рисков. Для корректной работы системы нечеткой логики стоит соблюдать рассмотренные в данной статье основные этапы построения систем нечеткой логики с экспертными оценками. Также необходимо правильно выбирать подходящие функции принадлежности в зависимости от выбранного приложения и в зависимости от того, какую оценку требуется получить. Стоит уделить особое внимание выбору подходящих экспертов и методу сбора экспертных оценок, чтобы можно было корректно проводить опросы, а после описывать правила для системы нечеткой логики.

### Список литературы

1. Rezaei K. A Fuzzy Inference System for Assessment of the Severity of the Peptic Ulcers. / K. Rezaei, R. Hosseini, M. Mazinani // *Computer Science & Information Technology*. 2014. P. 263–271.
2. Radionovs A. Uzhga-rebrov. Application of Fuzzy Logic for Risk Assessment. // *Information Technology and Management Science*. 2014. P. 50-54.
3. Singhala P. Temperature Control using Fuzzy Logic. / P. Singhala, D.N. Shah, B. Patel // *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)*. 2014. No. 4(1). P. 1-10.
4. Kose U. Fundamentals of Fuzzy Logic with an Easy-to-use, Interactive Fuzzy Control Application. // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2012. No. 2(3). P. 1198-1203.
5. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. / John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
6. Korol T. An Evaluation of Effectiveness of Fuzzy Logic Model in Predicting the Business Bankruptcy. / T. Korol, A. Korodi // *Romanian Journal of Economic Forecasting*. 2011. No. 3. P. 92-107.
7. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. // *International Journal of Information Control*. 1965. No. 8. P. 338-353.
8. Bai Y. Fundamentals of Fuzzy Logic Control – Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. / Y. Bai, D. Wang // *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, 1982, pp. 17–36.
9. Wang C. A Study of Membership Functions on Mamdani- Type Fuzzy Inference System for Industrial. / PhD thesis, Lehigh University, 2015.
10. Mathworks C. Fuzzy Logic Toolbox User' s Guide. / Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc, 2021.
11. Mamdani E.H. An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. / E.H. Mamdani, S. Assilian // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. No. 7(1). P. 1-13.
12. Negnevitsky M. Artificial Intelligence (Second). / Pearson Education Limited 2002, 2010.
13. Takagi T. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. / T. Takagi, M. Sugeno // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985. No. 15(1). P. 116–132.
14. Toth-laufer E., Takacs M. The Effect of Aggregation and Defuzzification Method Selection on the Risk Level Calculation. // 10th IEEE Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. 2012. P. 131-136.
15. Singh H. Real-Life Applications of Fuzzy Logic. / H. Singh [etc.] // *Advances in Fuzzy Systems*. 2013. P. 1-3.
16. Leung K., Verga S. Expert Judgement in Risk Assessment Expert Judgement in Risk Assessment. / Defence R&D Canada Centre for Operational Research & Analysis, 2007. P. 321-354.
17. Otwayl H., Winterfeldt D. Von. Expert Judgment in Risk Analysis and Management: Process, Context, and Pitfalls. // *Risk Analysis*. 1992. No. 12(I). P. 82-93.
18. Turisova R. Verification of the Risk Assessment Model through An Expert Judgment. *Kvalita Inovacia Prosperita* / R. Turisova, J. Mihok, J. Kadarova // *Quality Innovation Prosperity*. 2012. P. 37-48.

Воронежский государственный технический университет  
Voronezh State Technical University

Поступила в редакцию 23.05.2022

**Информация об авторах**

**Ермаков Сергей Александрович** – канд. техн. наук, Воронежский государственный технический университет, e-mail: mnac@comch.ru

**Болгов Андрей Александрович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет, e-mail: mnac@comch.ru

**Чурсин Андрей Германович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет, e-mail: mnac@comch.ru

**FUZZY LOGIC BASED ON EXPERT ASSESSMENTS AS AN ALTERNATIVE TOOL  
FOR RISK ASSESSMENT IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY**

**A.A. Bolgov, S.A. Ermakov, A.G. Chursin**

The paper considers the theory of fuzzy logic based on expert assessments. The theory of fuzzy sets is analyzed and compared with Boolean logic. The stages of fuzzification, membership functions, fuzzy rules, rule aggregation, and defuzzification are studied in detail. Various membership functions are considered in detail in relation to the theory of fuzzy sets. The applications in which the fuzzy logic system is used are analyzed. Expert assessments are considered, what they are and what they depend on. The main criteria for selecting an expert from among the candidates are highlighted. The peculiarities of conducting interviews with experts are revealed. The stages of obtaining expert assessments are considered. A comparative table of methods for collecting expert assessments is given. In conclusion, it is concluded that the fuzzy logic system based on expert evaluation is a powerful tool in risk analysis.

Keywords: fuzzy logic, risk, quantitative assessment, qualitative assessment, membership function, security.

Submitted 23.05.2022

**Information about the authors**

**Sergey A. Ermakov** – Cand. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University, e-mail: mnac@comch.ru

**Andrey A. Bolgov** – graduate student, Voronezh State Technical University, e-mail: mnac@comch.ru

**Andrey G. Chursin** – graduate student, Voronezh State Technical University, e-mail: mnac@comch.ru