

Использование нечёткого логического вывода для оценки эффективности процесса ликвидации аварии водопровода

М.А. Большеланов, О.А. Торопова

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Аннотация: Целью статьи является изучение возможности влияния разнообразных факторов, оказывающих воздействие на процесс ликвидации аварии водопровода на основе его моделирования методами нечеткой логики. В статье обсуждаются различные варианты по управлению процессом ликвидации аварии водопровода и в ходе анализа определяется комплекс качественных параметров, которые используются в модели нечёткого вывода на основе метода Мамдани. Для построения математической модели с помощью группы экспертов были сформулированы 37 продукций, благодаря чему модель может работать с выделенными качественными переменными как с количественными и отслеживать изменения, которые происходят в процессе. Результатом цикла логического вывода является чёткое значение параметров, описывающих возможные действия, необходимые для ликвидации аварии. Полученная математическая модель позволяет анализировать входные параметры на качественном уровне, даёт на выходе качественное представление получаемого результата, что повысит эффективность действий, направленных на ликвидацию аварии водопровода. Качество функционирования описываемой модели верифицируется группой экспертов.

Ключевые слова: фаззификация, дефаззификация, метод Мамдани, системный анализ, нечеткая логика, качественные параметры, авария водопровода, математическая модель.

Введение

Аварии на инфраструктуре водоснабжения в коммунальном секторе представляют собой одну из наиболее распространенных категорий чрезвычайных ситуаций в городских условиях [1]. Эти инциденты могут иметь серьезные последствия, включая повреждение дорожного покрытия, затопление зданий и нарушение функционирования систем водоснабжения, что, в свою очередь, создает угрозу для гражданской безопасности. В данной статье определяется перечень параметров, оказывающих влияние на процесс ликвидации аварий на водопроводных системах. Эти параметры впоследствии используются для разработки математической модели, предназначенной для оценки целесообразности проведения ремонтных работ с использованием методов нечеткой логики [2].

Нечеткий логический вывод представляет собой математическую модель, предназначенную для исследования или управления нечеткой информацией на основе качественной модели правил, сформулированных экспертами в условиях неопределенности [3, 4]. В основе подхода имеется ряд ключевых компонентов: нечеткие множества, лингвистические переменные и правила вывода. Каждый из этих компонентов необходим для определения данных и самого процесса логического вывода с получением чёткого результата.

Качественные характеристики используемых параметров выражаются через функции принадлежности, которые оценивают степень принадлежности элементов универсального множества к нечеткому множеству, что позволяет учитывать неопределенность данных. Лингвистические переменные представляют собой набор терминов (термов), как естественного, так и искусственного языка, предназначенных для описания качественных аспектов данных. Эти термины служат символическими обозначениями определенных значений или диапазонов значений.

Их применение делает возможным использование естественного языка описания нечеткости, что делает модель более понятной и интерпретируемой. В процессе формирования выводов используются правила вывода, которые объединяют нечеткие множества и лингвистические переменные. Они формулируются в виде логического высказывания, которое задает условия и то, что будет случаться на основе этих условий. Эти правила позволяют выполнить моделирование логики принятия решения в условиях неопределенности. Эти компоненты позволяют учитывать нечеткие значения и различные степени принадлежности к определенным категориям.

Такой подход является специальным, поскольку обработка качественных параметров трудно описывается количественно. Нечеткая логика обычно применяется к различным аспектам управления, прогнозирования, образов решения, поскольку неопределенность также является элементом принятия решения [5, 6].

Литературный обзор

Для определения качественных параметров управления процессом ликвидации аварий предварительно был проведен системный анализ источников, касающихся данной тематики, а также изучены нормативные документы, в которых описываются различные параметры, способные оказать влияние на процесс устранения аварий на водопроводе.

В ходе анализа было найдено относительно небольшое количество публикаций в русскоязычных журналах, однако в зарубежных ресурсах подобные темы чаще поднимаются и обсуждаются.

Модель, предложенная в работе [7], представляет собой инструмент для оценки состояния и прогнозирования разрушения водопроводных труб. Основой этой модели является нечеткая логика, позволяющая учитывать различные факторы, влияющие на износ и долговечность водопровода. В частности, в работе рассматриваются такие входные параметры для модели, как протяженность прокладки труб, давление воды, качество воды и уровень технического обслуживания. Выходной параметр модели — это оценка риска прорыва водопровода. Этот показатель позволяет заранее идентифицировать наиболее уязвимые участки сети и планировать превентивные меры до наступления критической ситуации. Тестирование данной модели было проведено на реальных данных, собранных в городе Эль-Педрегаль, Перу. Модель смогла корректно спрогнозировать схему риска прорыва водопровода для различных входных.

В статье [8] поднимается проблема предотвращения аварий на водопроводных системах. В предлагаемом подходе авторы обращаются к использованию нейросетевых технологий, а именно многослойного персептрона, для анализа данных и прогнозирования потенциальных неисправностей. Нейросеть обрабатывает входные параметры, среди которых глубина закладки водопровода, наличие утечек, длина трубопровода и его возраст. Каждый из этих факторов непосредственно влияет на эксплуатацию и долгосрочную надежность водопроводной инфраструктуры. Данные для обучения и тестирования модели были собраны на основе информации о состоянии водопроводной системы в Сеуле, Южная Корея, за период с 1989 по 2010 год. Это позволило охватить обширный временной диапазон и учесть различные сценарии эксплуатации.

Данные были разделены на две части: 70% отведено для обучения нейросети, а остальные 30% использованы для тестирования и проверки качества работы модели. Такое разделение позволяет избежать переобучения и убедиться в способности модели правильно интерпретировать новые данные. Результаты тестирования продемонстрировали хорошую эффективность модели, однако авторы признают, что она обладает потенциалом для дальнейших улучшений. Среди перспективных направлений усовершенствования — интеграция новых данных, увеличение числа учитываемых параметров и улучшение архитектуры нейросети.

Работа [9] предлагает моделирование процесса оценки риска аварии водопровода посредством иерархической модели нечеткой логики. В рамках исследования была разработана структура, состоящая из трех взаимосвязанных моделей, реализованных в среде MATLAB. Каждая из этих моделей предназначена для обработки определенного набора входных параметров, влияющих на состояние водопроводной системы. Первая модель сосредоточена на анализе глубины закладки труб и их общей протяженности.

Эти два фактора оказывают значительное воздействие на эксплуатационные характеристики трубопровода, включая устойчивость к внешним нагрузкам и возможность механических повреждений. Вторая модель ориентирована на учет возраста труб и наличия утечек. Оба эти показателя отражают текущее техническое состояние водопровода. Третья модель является итоговым звеном в иерархии и объединяет выходные данные первых двух моделей. Она позволяет обработать информацию, полученную на предыдущих этапах, и сформировать конечную оценку риска аварии на основании всех учтенных факторов. Разработанная модель была проверена на реальных данных, собранных в ходе мониторинга состояния водопровода. Тестирование показало, что предложенный подход способен адекватно оценивать вероятность аварийных ситуаций и делать прогнозы относительно будущего состояния системы.

Тем не менее, авторы подчеркивают, что модель требует дальнейшей оптимизации. Планы на будущее предусматривают расширение возможностей модели путем включения дополнительных параметров, таких как качество воды, материалы труб и частота технического обслуживания. Также возможно внедрение алгоритмов машинного обучения для автоматической адаптации модели к меняющимся условиям эксплуатации. Эти шаги позволят сделать систему еще более гибкой и точной, способной оперативно реагировать на изменения в состоянии водопровода и предупреждать возможные аварии.

В рамках изучения методов прогнозирования и построения моделей было проанализировано несколько обзорных статей, в которых описываются различные подходы к математическому моделированию процессов [10]. Так, например, некоторые авторы предлагают помимо описанных ранее методов моделирования нечеткой логики и нейросетей – использовать системную

динамику для контроля процессов [11], так как полученная модель также сможет качественно прогнозировать результат, получая новые входные.

Таким образом, в большинстве статей основное внимание уделяется оценке вероятности прорыва водопровода. В отличие от этого, в данной работе акцент сделан на влияние на процесс ликвидации аварии уже после её возникновения. Это делает проблематику статьи оригинальной и открывает значительные перспективы для дальнейшего исследования.

Материалы и методы

Для управления процессом ликвидации аварии на водопроводе, после выполнения системного анализа и привлечения экспертов, были выделены следующие ключевые качественные параметры:

- Урон водопроводу (X_1);
- Важность узла (X_2);
- Состояние водопроводной магистрали (X_3);
- Ущерб коммерческой инфраструктуре (X_4);
- Труднодоступность/сложность развязки водопровода (X_5);
- Ущерб городской инфраструктуре (X_6);

Для создания модели нечеткой логики было решено использовать метод Мамдани, взяв за основу лингвистических переменных выбранные параметры.

На этой основе была спроектирована структура модели нечеткой логики для процесса управления ликвидацией аварии водопровода (рис.1). Эта модель включает в себя входные и выходные лингвистические переменные и реализует алгоритм Мамдани для обработки и анализа данных [9].

Входные и выходные параметры были проанализированы группой экспертов, в результате чего лингвистические переменные были разделены на термы. Экспертам было предложено для определения диапазонов терм

одно универсальное множество для каждой лингвистической переменной – $[0,1]$.

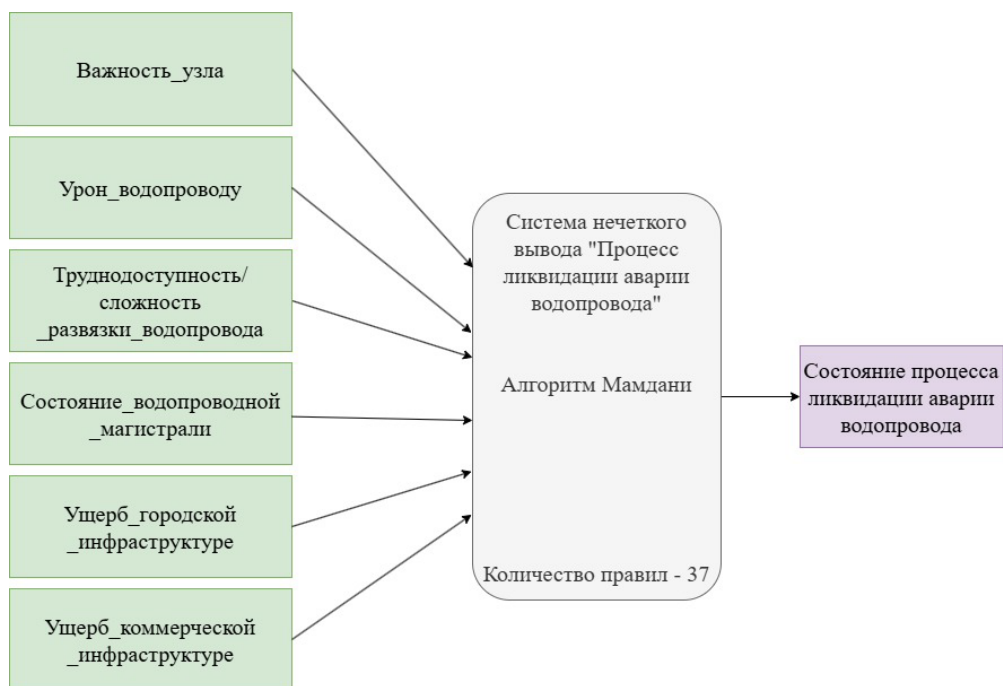


Рис. 1. – Структура модели нечеткой логики для процесса управления ликвидацией аварии водопровода

Например, для переменной X5 (Труднодоступность/Сложность развязки водопровода), термы и соответствующие чёткие диапазоны выглядят следующим образом:

- «Легкодоступен», что соответствует терму X5_1, определенному на диапазоне $[0; 0,3]$;
- «Труднодоступен или запутанная развязка», что соответствует терму X5_2, определенному на диапазоне $[0,25; 0,7]$;
- «Очень сложная развязка», что соответствует терму X5_3, определенному на диапазоне $[0,6; 1]$.

На рис.2 показано определение для лингвистической переменной X5 функции принадлежности. Скриншот представляет собой пользовательский интерфейс для работы с нечеткой логикой в ПО MatLab в разрезе входной переменной.

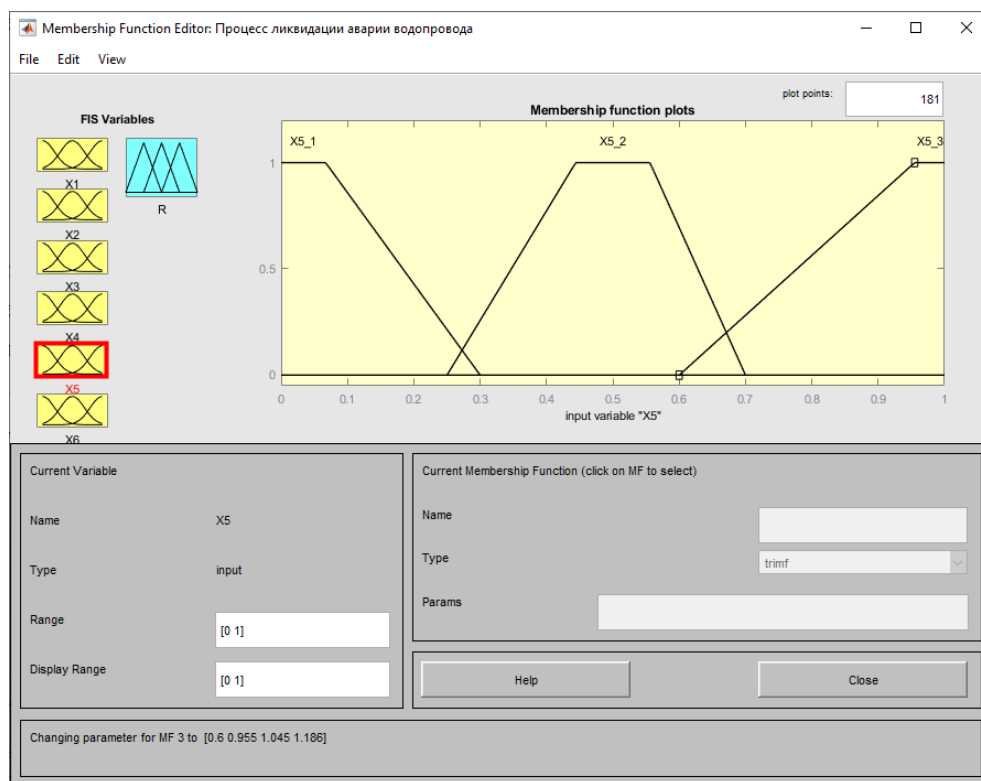


Рис. 2. – График функции принадлежности входного параметра - Сложность/Труднодоступность развязки водопровода в среде MatLab

Выходным параметром является лингвистическая переменная R – Состояние процесса ликвидации аварии водопровода. Ниже представлены термы для конечного параметра:

- «Процесс ликвидации невозможен», что соответствует терму R_1, определенному на диапазоне [0; 0,05];
- «Процесс ликвидации практически остановлен», что соответствует терму R_2, определенному на диапазоне [0,05; 0,2];
- «Процесс ликвидации сильно затруднен», что соответствует терму R_3, определенному на диапазоне [0,2; 0,35] ();
- «Процесс ликвидации затруднен», что соответствует терму R_4, определенному на диапазоне [0,35; 0,5] ();
- «Процесс ликвидации медленно выполняется», что соответствует терму R_5, определенному на диапазоне [0,5; 0,65];

- «Процесс ликвидации выполняется», что соответствует терму R_6 , определенному на диапазоне $[0,65; 0,8]$;
- «Процесс ликвидации выполняется успешно», что соответствует терму R_7 , определенному на диапазоне $[0,8; 0,95]$;
- «Процесс ликвидации выполняется максимально эффективно», что соответствует терму R_8 , определенному на диапазоне $[0,95; 1]$;

На рис.3 показано предложенное определение выходной переменной, визуализация выполнена при помощи пользовательского интерфейса для работы с нечеткой логикой в ПО MatLab для выходной переменной:

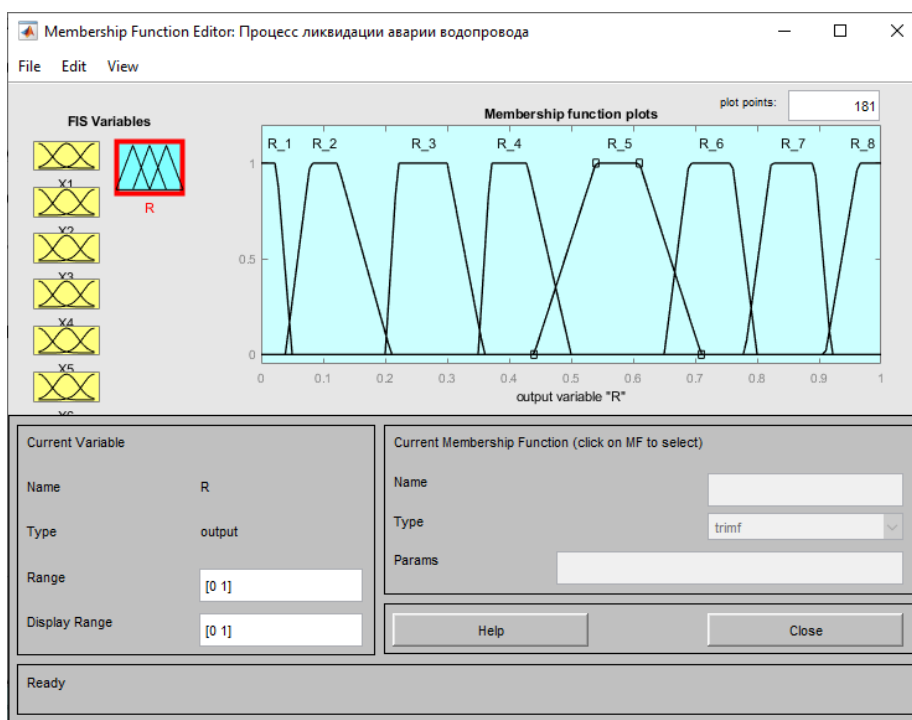


Рис. 3. – График функции принадлежности выходного параметра в ПО
MatLab

В результате анализа информации из нормативных актов и расчетных документов, с помощью группы экспертов было сформулировано 37 правил, на основе которых происходит логический вывод с последующей агрегацией и дефаззификацией результата обработки входных параметров. Ниже представлено несколько наиболее показательных правил из общего списка:

Правило, описанное в таблице 1, показывает, каким образом на оценку состояния процесса ликвидации аварии водопровода влияет наихудшее состояние каждого параметра.

Таблица №1.

Правило номер 1

ЕСЛИ:	Важность узла = Критический Урон водопроводу = Высокий Труднодоступность/сложность развязки водопровода = Очень сложная развязка Состояние водопроводной магистрали = Аварийная Ущерб городской инфраструктуре = Очень высокий Ущерб коммерческой инфраструктуре = Очень высокий
ТОГДА:	Состояние процесса ликвидации аварии водопровода = Процесс ликвидации невозможен

Правило, описанное в таблице 2, показывает, каким образом на оценку состояния процесса ликвидации аварии водопровода влияют параметры «Труднодоступность/Сложность развязки водопровода» и «Состояние водопроводной магистрали» в состояниях «Очень сложная развязка» и «Аварийная» соответственно, а также «Урон водопроводу» в виде значения термина «Средний».

Таблица №2

Правило номер 2

ЕСЛИ:	Важность узла = Не важный Урон водопроводу = Средний Труднодоступность/сложность развязки водопровода = Очень сложная развязка Состояние водопроводной магистрали = Аварийная Ущерб городской инфраструктуре = Незначительный Ущерб коммерческой инфраструктуре = Ощутимый
ТОГДА:	Состояние процесса ликвидации аварии водопровода = Процесс ликвидации затруднен

В среде MatLab сформулированные правила выглядят следующим образом (рис.4).

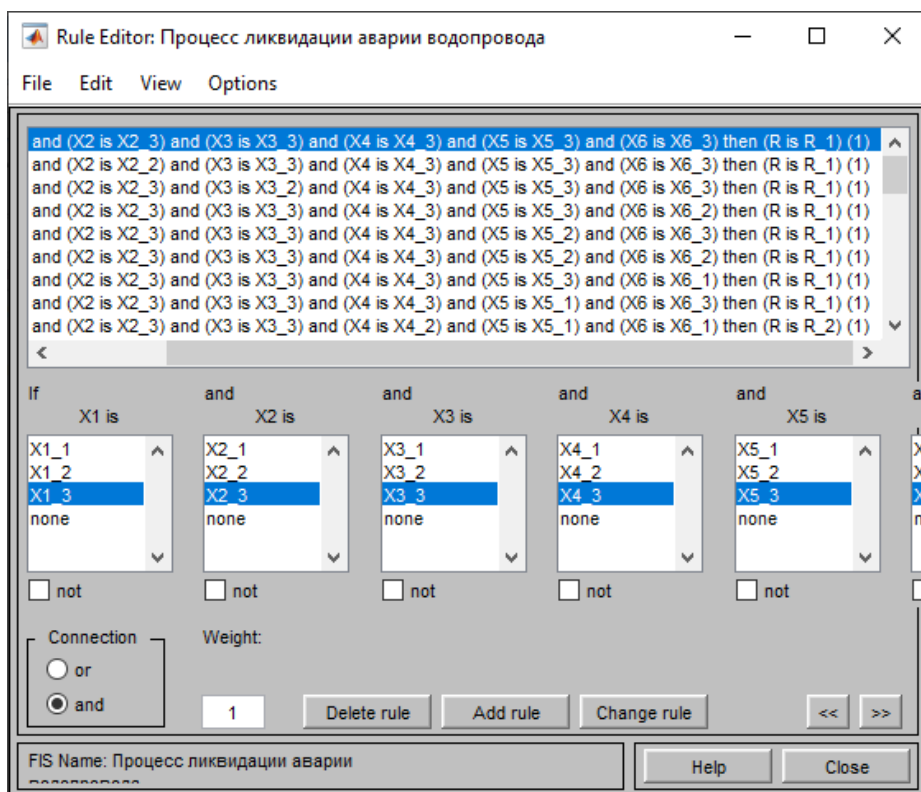


Рис. 4. – Конфигурация правил продукций

Таким образом, основываясь на нормативных документах, при помощи группы экспертов была реализована математическая модель, состоящая из 5 входных параметров и 1 выходного. Каждый параметр был разделен на термы, а их совокупное влияние было представлено в виде 37 правил продукций и реализовано в ПО MatLab.

Результаты

В результате проведенной работы была реализована математическая модель нечеткой логики для управления процессом ликвидации аварии водопровода. На рис.5 приведена модель, разработанная и внесенная в ПО MatLab для демонстрации работы.

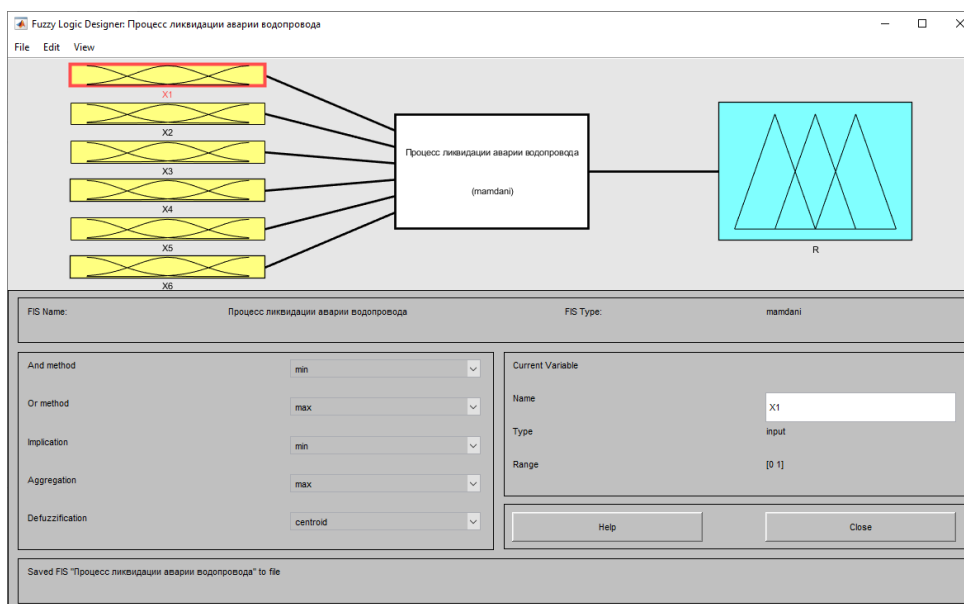


Рис. 5. – Модель «Процесс ликвидации аварии водопровода» в ПО MatLab

В рамках демонстрации эффективности работы модели группе экспертов было предложено оценить результаты на основе нескольких комбинаций состояний входных переменных.

На рис.6 представлены результаты работы описанной модели в виде построчно представленных в виде графиков правил продукций, на которых видно выполнение условий активации правила, визуализировано то, насколько сильно задействованы термы входных переменных, а также влияние выполнения этих правил на выбор терма выходного параметра.

На рис.7 можно увидеть совокупный график с дефазифицированным значением работы модели.

Также, опираясь на описание выходной лингвистической переменной, возможные параметры которой были описаны выше, можно сделать вывод, что состояние процесса ликвидации аварии водопровода описывается термом «Процесс ликвидации выполняется успешно». Группа экспертов подтвердила, что результаты, которые выдаёт разработанная модель для различных вариантов значений параметров, являются корректными и адекватными в соответствии с экспертной оценкой.

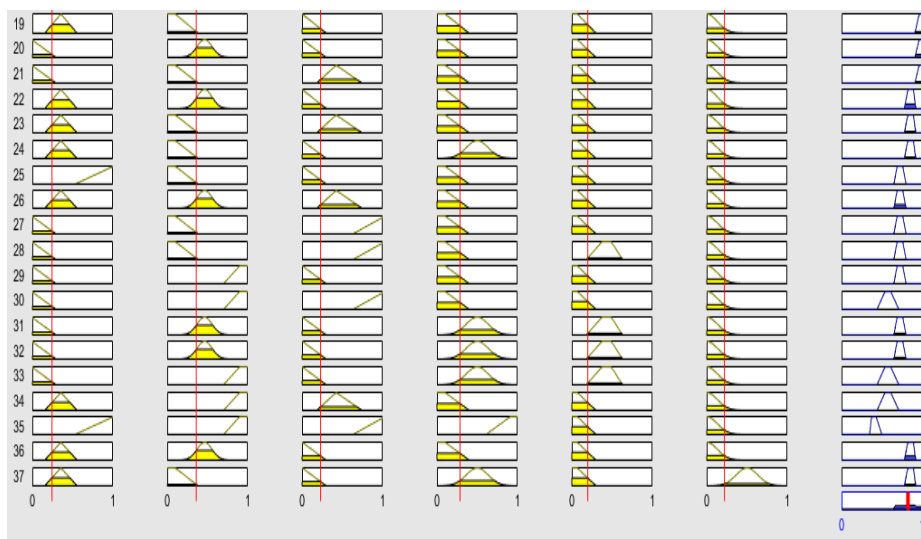


Рис. 6. – Визуализация работы правил с распределением терм в ПО MatLab

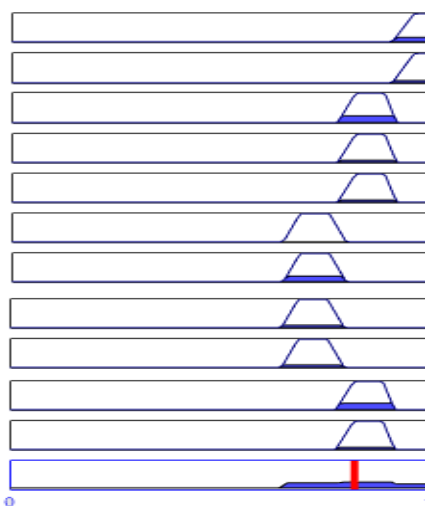


Рис. 7. – Совокупный график для выходной лингвистической переменной
«Состояние процесса ликвидации аварии водопровода»

Обсуждение

В статье описывается создание модели нечеткой логики для обработки качественных параметров в процессе ликвидации аварии водопровода. Входные качественные параметры сначала фаззифицируются, затем реализуется нечёткий логический вывод на основе 37 правил. Затем полученный результат дефаззифицируется для возможности адекватно воспринимать информацию человеком.

Данная модель была верифицирована группой экспертов, и ее можно использовать в системах мониторинга по управлению процессом ликвидации аварий водопровода в качестве подсистемы-помощника для принятия решения.

Заключение

В данной статье был проведен системный анализ проблемы управления процессом ликвидации водопровода. Выявлены качественные параметры, оказывающие наибольшее влияние на процесс, затем они были фаззифицированы. На основе этих параметров при помощи алгоритма Мамдани была реализована математическая модель нечеткой логики. В рамках создания модели было создано 37 правил, на основе которых происходит агрегация данных, полученных на вход. В результате агрегации полученный результат дефаззифицируется и представляет конечный ответ. Модель было перенесена на ПО MatLab в рамках демонстрации работоспособности модели.

Литература

1. Героева А.М., Зильберова И.Ю. Прогнозирование и диагностика технического состояния объектов коммунальной инфраструктуры // Инженерный вестник Дона. 2012, №4(1) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1074.
2. Большелапов М.А., Бровко А.В., Создание математической модели управления процессом ликвидации коммунальных аварий с прорывом водопровода. // Материалы XIX Международной научно-практической конференции. Саратов, 2023. С. 608-612
3. Венцов Н.Н., Долгов В.В., Подколзина Л.А. Об одном способе построения запросов к базе данных на основе аппарата нечеткой логики //

Инженерный вестник Дона. 2015, №3 URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3172.

4. Веселов О.В. Нечеткая логика и нейронные сети в системах управления и диагностике. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2023. 288 с.

5. Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии // Отходы и ресурсы. 2021. Т.8. №1. С. 10-12.

6. Sergi D., Ucal S.I. Prioritization of public services for digitalization using fuzzy Z-AHP and fuzzy Z-WASPAS // Complex & Intelligent Systems. 2021. V.7. №2. pp. 841-856.

7. Dawood T., Elwakil E., Novoa H., Delgado J. Prediction of Water Pipe Failure Using Fuzzy Inference System // Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021, CSCE21 Structures Track. 2022. V.1. pp. 159-165.

8. Qureshi M.Sh., Aljarbough A., Fayaz M., Qureshi M.B., Mashwani W.K., Junaid K. An Efficient Methodology for Water Supply Pipeline Risk Index Prediction for Avoiding Accidental Losses // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. V. 11(5). pp. 385-393.

9. Fayaz M., Ahmad Sh., Hang L., Kim D.H. Water Supply Pipeline Risk Index Assessment Based on Cohesive Hierarchical Fuzzy Inference System // Processes. 2019. V. 7(4). URL: doi.org/10.3390/pr7040182.

10. Садовничий В.А., Акаев А.А., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики. М.: ИСПИ РАН, 2012. 359 с.

11. Аветисян Ю.А., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Родичев В.А. Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №11. С. 43–47.

References

1. Geroeva A.M., Zil'berova I.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012, №4(1) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1074.
2. Bol'shelapov M.A., Brovko A.V., Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Saratov, 2023. pp. 608-612
3. Ventsov N.N., Dolgov V.V., Podkolzina L.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3172.
4. Veselov O.V. Nechetkaya logika i neyronnye seti v sistemakh upravleniya i diagnostike [Fuzzy logic and neural networks in control and diagnostic systems]. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2023. 288 p.
5. Savchenko D.V., Reznikova K.M., Smyshlyaeva A.A. Otkhody i resursy. 2021. V.8. №1. pp. 10-12.
6. Sergi D., Ucal S.I. Complex & Intelligent Systems. 2021. V.7. №2. pp. 841-856.
7. Dawood T., Elwakil E., Novoa H., Delgado J. Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021, CSCE21 Structures Track. 2022. V.1. pp. 159-165.
8. Qureshi M.Sh., Aljarboun A., Fayaz M., Qureshi M.B., Mashwani W.K., Junaid K. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. V. 11(5). pp. 385-393.
9. Fayaz M., Ahmad Sh., Hang L., Kim D.H. Processes. 2019. V. 7(4). URL: doi.org/10.3390/pr7040182.
10. Sadovnichiy V.A., Akaev A.A., Korotaev A.V., Malkov S.Yu. Modelirovanie i prognozirovanie mirovoy dinamiki [Modeling and forecasting of global dynamics]. M.: ISPI RAN, 2012. 359 p.
11. Avetisyan Yu.A., Kushnikov V.A., Rezchikov A.F., Rodichev V.A. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2009. №11. pp. 43–47.

Дата поступления: 16.05.2025 Дата публикации: 25.07.2025
