

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧКИ В ТЕПЛОВОЙ КАМЕРЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

© А. А. Балашов¹✉, Д. В. Корпусов²

¹ Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»,
balashovalexei@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;

² МУП «Тамбовтеплосервис», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: нечеткая логика; тепловая камера; тепловая сеть; утечка; MATLAB.

Аннотация: Основными параметрами, оказывающими существенное влияние на надежность системы теплоснабжения, являются вероятность безотказной работы и коэффициент готовности, которые зависят от работоспособности тепловых камер на тепловых сетях. Контроль утечек в тепловых камерах зависит от многих факторов, а именно от таких параметров, как температура и влажность внутреннего воздуха, уровень воды. Разработаны принципы построения контроля утечки в тепловой камере на основе нечеткой логики, модель нечеткой логики, выполненная с использованием пакета прикладных программ MATLAB, основанная на алгоритме Мамдани. Рассмотренный метод контроля позволяет определить аварийную ситуацию при утечке теплоносителя в тепловой камере по таким параметрам, как температура и влажность внутреннего воздуха, а также уровень воды.

Введение

Основная цель надежности системы теплоснабжения — бесперебойное снабжение потребителей тепловой энергией и теплоносителями в течение заданного периода, недопущение опасных для людей и окружающей среды ситуаций. Под надежностью теплоснабжения понимают способность действующих и проектируемых тепловых сетей обеспечивать в течение заданного времени требуемые режимы, параметры и качество теплоснабжения (отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, а также технологических потребностей предприятий в паре и горячей воде) [1]. В свою очередь, тепловая сеть состоит из наружной системы, которая включает котельные, трубопроводы, тепловые пункты и тепловые камеры, а также внутренней системы — трубы, радиаторы, батареи, смесительные устройства, сантехнические приборы и запорную арматуру. В каждой из этих систем возможны утечки, которые приводят к перерасходу энергии и могут стать причиной возникновения аварийной ситуации, представляющей опасность для жизни людей. Основные причины утечек: нарушение герметичности соединений в результате коррозии труб, износа прокладок или ослабления резьбовых соединений; термическое расширение и сужение фитингов и т.п. Поэтому обнаружение утечек в тепловых камерах на тепловых сетях системы теплоснабжения является одной из актуальных и важных задач для жилищно-коммунального хозяйства России [2].

Цель работы – разработка подходов применения аппарата нечетких множеств в задаче обнаружения утечки в тепловой камере системы теплоснабжения.

Постановка задачи

В системе теплоснабжения возможны утечки теплоносителя вследствие коррозии труб, разгерметизации соединения и механических повреждений, которые могут возникать в процессе эксплуатации и при гидравлических испытаниях трубопроводов. Раннее обнаружение утечек критически важно для предотвращения техногенных аварий, снижения потерь тепловой энергии и минимизации затрат на восстановительный ремонт.

Пусть даны следующие измеряемые (входные) параметры в случае утечки теплоносителя в тепловой камере системы теплоснабжения, наиболее релевантные для прямого мониторинга микроклимата внутри тепловой камеры: изменения температуры воздуха внутри тепловой камеры $T(\tau)$, влажности воздуха $\varphi(\tau)$ и уровня воды $U(\tau)$, в случае утечки, в тепловой камере (рис. 1). Выходным параметром является вероятность утечки $L(\tau)$ с изменением в диапазоне $[0, 1]$. Также имеются следующие неопределенности: зашумленность данных, нелинейная зависимость параметров и субъективность в оценке «нормальных» значений.

На рисунке 1 представлена схема системы нечеткого контроля уровня воды в тепловой камере. Модель включает следующие основные компоненты:

1) объект контроля – тепловая камера, где осуществляется мониторинг и регулирование уровня воды. Входными параметрами для контроля являются изменения температуры воздуха внутри тепловой камеры $T(\tau)$, влажности воздуха $\varphi(\tau)$ и уровня воды $U(\tau)$;

2) система нечеткого контроля – блок, реализующий алгоритмы нечеткой логики для обработки входных данных и принятия решений;

3) ЛПР (лицо, принимающее решения) – может интерпретироваться как оператор или программный модуль, который на основе выходных данных системы нечеткого контроля вносит корректировки в работу тепловой камеры.

Схема иллюстрирует замкнутый цикл управления, где нечеткая логика обеспечивает адаптивное регулирование параметров в условиях неопределенности и изменяющихся внешних условий. Данная модель демонстрирует эффективность применения методов нечеткого контроля в задачах управления технологическими процессами. Требуется построить систему нечеткого контроля, которая анализирует изменения (T, φ, U) в реальном времени τ , а также оценивает вероятность утечки $L(\tau) \in [0, 1]$ и принимает решение о наличии утечки при $L(\tau) \geq \theta$, где θ – порог срабатывания.

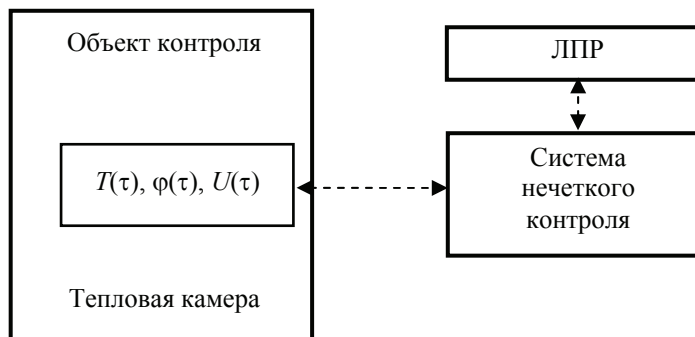


Рис. 1 Модель нечеткого контроля уровня воды в тепловой камере

Целевая функция в данной задаче должна отражать оптимальность работы системы обнаружения утечки, минимизировать ложные срабатывания и пропуски реальных утечек.

Формализация целевой функции, как взвешенная сумма ошибок, будет иметь следующий вид:

$$J(\omega_1, \omega_2) = \omega_1 \text{FP} + \omega_2 \text{FN} \rightarrow \min ,$$

где ω_1, ω_2 – весовые коэффициенты, отражающие важность минимизации ложных срабатываний и пропусков утечек соответственно; FP (*англ.* False Positive) – ложное срабатывание (ошибка 1-го рода); FN (*англ.* False Negative) – пропуск утечки (ошибка 2-го рода).

Далее опишем уточненную целевую функцию с учетом нечеткой логики. Если модель выдает степень уверенности в утечке $L(\tau) \in [0, 1]$, то можно ввести порог срабатывания θ и определить

$$\begin{cases} \text{FP} = \sum I(L_i \geq \theta \text{ при отсутствии утечки}), \\ \text{FN} = \sum I(L_i < \theta \text{ при наличии утечки}), \end{cases}$$

где I – функция Хевисайда или функция-индикатор.

Тогда

$$J(\theta, \omega_1, \omega_2) = \omega_1 \text{FP}(\theta) + \omega_2 \text{FN}(\theta) \rightarrow \min_{\theta}.$$

В случае, если требуется оптимизация параметров модели, то можно добавить регуляризацию

$$J = \omega_1 \text{FP} + \omega_2 \text{FN} + \lambda C(M) \rightarrow \min_M ,$$

где $C(M)$ – мера сложности модели, например количество правил; λ – коэффициент регуляризации. Основной задачей коэффициента регуляризации является предотвращение переобучения, то есть ситуация, когда модель слишком хорошо подстраивается под обучающие данные и плохо работает с новыми. Если $\lambda = 0,01$, то модель может использовать 20 правил, а если $\lambda = 0,1$ – 5 – 10 самых важных правил. Таким образом, регуляризация упрощает модель и делает ее более устойчивой к шумам.

В нашем случае, с использованием входных и выходных параметров целевая функция будет иметь следующий вид:

$$J(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \omega_1 \text{FP} + \omega_2 \text{FN} + \omega_3 \tau_{\text{задерж}} \rightarrow \min_{M, \theta} , \quad (1)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – весовые коэффициенты, отражающие важность минимизации ложных срабатываний, пропусков утечек и времени между началом утечки и ее обнаружением; $\tau_{\text{задерж}}$ – время между началом утечки и ее обнаружением;

M – структура нечеткой модели (функции принадлежности, правила).

Несмотря на свою практическую ценность, модель (1), как и любой упрощенный подход, сталкивается с ограничениями при работе с реальными условиями, где распределение параметров микроклимата по площади и глубине камеры, а также субъективные экспертные оценки играют ключевую роль. В частности, задачи обнаружения утечек часто требуют учета не только количественных данных, но и качественных суждений экспертов, основанных на многолетнем опыте. Именно здесь на первый план выходит аппарат нечеткой логики, способный формализовать подобные эвристики. Этот математический инструмент, в отличие от

классических методов, позволяет перевести интуитивные понятия, такие как «высокая температура» или «средний уровень воды», в алгоритмически интерпретируемые правила, что критически важно для создания адаптивных систем управления в условиях неполной информации и пространственной неоднородности параметров.

Современные алгоритмы нечеткого логического вывода реализуются в рамках единой методологической схемы, включающей последовательность обязательных этапов обработки данных: формирование базы нечетких правил – построение системы продукционных правил вида «ЕСЛИ < антецедент >, ТО < консеквент >», где антецедент и консеквент выражаются в терминах лингвистических переменных; процедура фазификации – преобразование четких входных значений в степени принадлежности к соответствующим нечетким множествам на основе заданных функций принадлежности; агрегирование антецедентов – вычисление общей степени истинности условия для каждого правила путем применения операций нечеткой логики ($\min$ для конъюнкции, $\max$ для дизъюнкции); активация подзаключений – определение результирующей формы функции принадлежности вывода на основе степени выполнения правила (методы $\min$ -активации или product -активации); аккумулярование выходных нечетких множеств – объединение модифицированных функций принадлежности всех активированных правил в результирующее нечеткое множество (операция $\max$ или аддитивная свертка); дефазификация – преобразование агрегированного нечеткого вывода в количественное значение посредством методов центра тяжести, среднего максимума или иных критериев.

Нечеткая модель обнаружения утечки в тепловой камере

В практике проектирования систем нечеткого вывода наибольшее распространение получили следующие алгоритмы: Мамдани, Цукамото, Сугено и Ларсена [3]. Каждый из них обладает специфическими особенностями, которые описаны ниже: в алгоритме Цукамото консеквенты правил задаются монотонными (возрастающими или убывающими) функциями, что отличает его от других методов при сохранении общей структуры вывода; алгоритм Сугено характеризуется использованием линейных комбинаций входных переменных в заключениях правил, что упрощает вычислительную процедуру; в методе Ларсена активация подзаключений осуществляется посредством prod -активации (умножения), формируя модифицированные нечеткие множества для последующего агрегирования.

Выбор конкретного алгоритма определяется требованиями задачи, структурой базы правил и видом функций принадлежности. В представленном исследовании использован алгоритм Мамдани с дефазификацией методом центра тяжести или центра площади, как наиболее универсальный и интуитивно понятный подход.

Далее представим в виде табл. 1 базу правил для детектирования утечек в тепловой камере. Для решения задачи обнаружения утечек в системе теплоснабжения разработана следующая система продукционных правил ($\Pi_1 - \Pi_{14}$), связывающих лингвистические переменные (**ЛП**) (температуру, уровень, влажность) с вероятностью утечки. Введены ЛП температуры воздуха; уровня воды; влажности воздуха и вероятности утечки с оценкой – низкая, средняя, высокая

На этапе фазификации осуществляется преобразование четких входных данных (например, измеренных значений температуры, уровня и влажности) в степени принадлежности к соответствующим термам лингвистических переменных. Это выполняется на основе заданных функций принадлежности (треугольных, трапецевидных, гауссовых и др.), параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 1

База правил для детектирования утечек
в тепловой камере

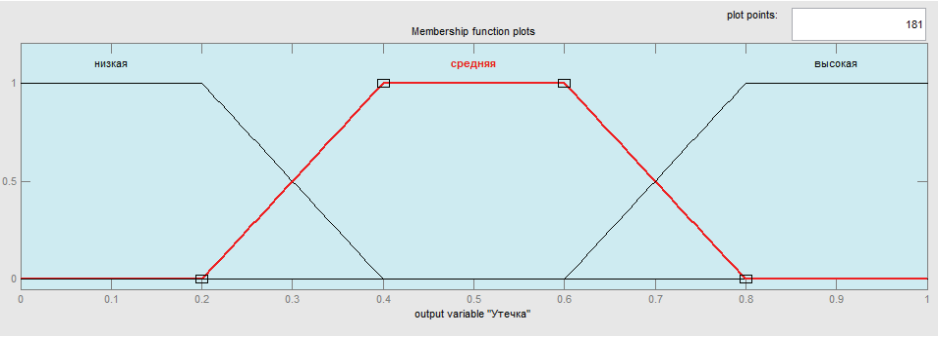
Правило	Антецедент	Консеквент
П ₁	температура = высокая И уровень = высокий	вероятность утечки = высокая
П ₂	температура = низкая И уровень = низкий	вероятность утечки = низкая
П ₃	температура = низкая И уровень = средний	вероятность утечки = средняя
П ₄	температура = низкая И уровень = высокий	вероятность утечки = средняя
П ₅	температура = средняя И уровень = высокий	вероятность утечки = высокая
П ₆	влажность = высокая И температура = высокая	вероятность утечки = высокая
П ₇	влажность = низкая И температура = низкая	вероятность утечки = низкая
П ₈	влажность = средняя И температура = средняя	вероятность утечки = средняя
П ₉	влажность = высокая И температура = низкая	вероятность утечки = низкая
П ₁₀	влажность = высокая И температура = средняя	вероятность утечки = средняя
П ₁₁	влажность = высокая И уровень = высокий	вероятность утечки = высокая
П ₁₂	влажность = низкая И уровень = низкий	вероятность утечки = низкая
П ₁₃	влажность = средняя И уровень = низкий	вероятность утечки = низкая
П ₁₄	влажность = высокая И уровень = средний	вероятность утечки = средняя

Таблица 2

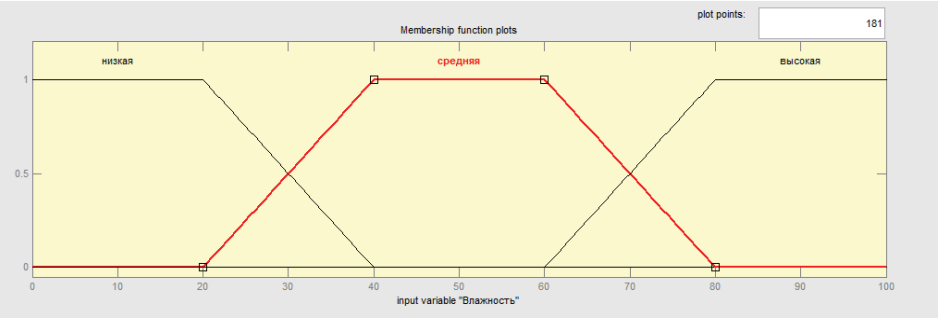
Значения параметров лингвистических переменных

Параметр	Значение параметров		
	низкое	среднее	высокое
Температура воздуха в колодце, °C	5...20	20...80	80...110
Уровень воды в колодце, м	0...0,2	0,2...1,4	1,4...2
Влажность в колодце, %	0...20	20...60	60...100
Вероятность утечки	0...0,2	0,2...0,6	0,6...1,0

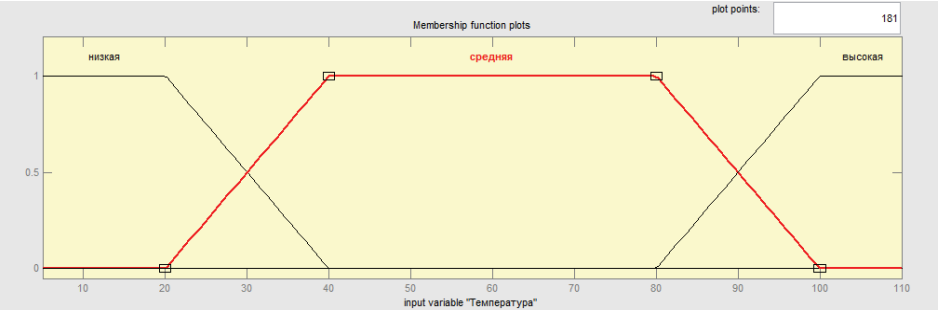
Графики функций принадлежности μ_P ЛП вероятности утечки, влажности воздуха, температуры воздуха, уровня воды в тепловой камере приведены на рис. 2. В рамках рассматриваемого примера выбраны трапециевидные функции принадлежности, что обусловлено их широким применением в задачах нечеткого моделирования благодаря балансу между точностью и вычислительной простотой. Как отмечается в литературе [3, 4], существует множество методов определения функций принадлежности, однако оптимальный выбор зависит от специфики решаемой задачи. В данном случае предпочтение отдано одному из наиболее простых подходов, что позволяет наглядно продемонстрировать принципы нечеткого логического вывода без избыточного усложнения модели.



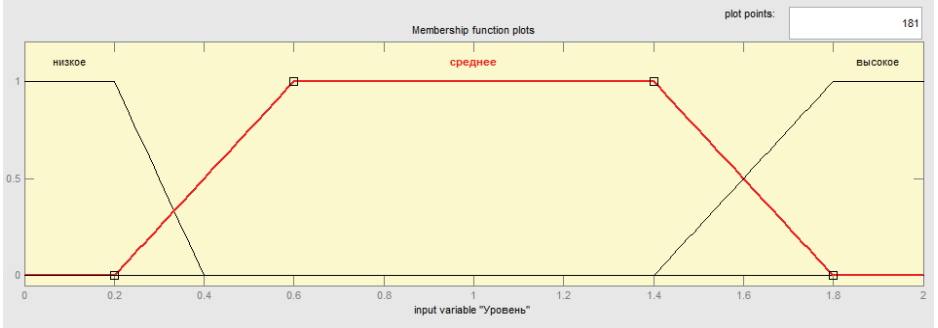
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Функции принадлежности ЛП:
 вероятности утечки (а), влажности воздуха (б), температуры воздуха (в),
 уровня воды в тепловой камере (г)

Далее представим процедуру фазификации входных параметров.

При текущей относительной влажности воздуха, составляющей 75 %, процедура фазификации позволила определить степени истинности для элементарных нечетких высказываний:

- «влажность воздуха низкая» – 0,00;
- «влажность воздуха средняя» – 0,25;
- «влажность воздуха высокая» – 0,75.

Аналогично, для температуры воздуха 95 °С получены следующие значения:

- «температура воздуха низкая» – 0,00;
- «температура воздуха средняя» – 0,25;
- «температура воздуха высокая» – 0,75.

Для уровня воды 1,7 м вычислены степени истинности:

- «уровень воды низкий» – 0,00;
- «уровень воды средний» – 0,25;
- «уровень воды высокий» – 0,75.

Агрегирование подусловий представляет собой процесс определения степени истинности составных условий для каждого правила нечеткого вывода. Каждое подусловие вида «β есть α» (например, «режим – квазистационарный») анализируется с использованием функции принадлежности $\mu_\alpha(x)$, где четкое значение входной переменной выступает в качестве аргумента. В данном случае агрегирование выполняется на основе операции нечеткой конъюнкции (логического «И»), что соответствует минимаксному подходу Заде:

$$\mu_{a_i \cap a_j}(x) = \min(\mu_{a_i}(x); \mu_{a_j}(x)),$$

где $\mu_{a_i \cap a_j}$ – результирующая степень истинности агрегированных подусловий a_i и a_j .

Далее приведем пример вычисления степеней истинности антецедентов. На основании результатов фазификации рассчитаны степени истинности для антецедентов правил системы нечеткого вывода, регулирующей контроль утечки в тепловой камере, представленные в табл. 3.

На этапе активации определяется степень истинности заключений каждого правила, а также формируются функции принадлежности для выходных переменных. В практике нечеткого вывода применяются следующие методы активации: min-активация (использование минимального значения); prod-активация (перемножение степеней принадлежности); average-активация (усреднение значений).

При min-активации функция принадлежности выходного термина ограничивается степенью истинности антецедента

$$\mu_{\text{акт}}(x) = \min(\mu(x), c),$$

где $\mu(x)$ – функция принадлежности термина выходной переменной, c – степень истинности антецедента.

Приведем примеры активации для следующих выбранных правил:

– ПРАВИЛО <1>: если «температура высокая» И «уровень высокий», то «вероятность утечки высокая». Поскольку $c_{12}(x) = 0,75$, результирующая функция принадлежности $\mu_{P(x)}$ ограничена значением 0,75;

– ПРАВИЛО <5>: если «температура средняя» И «уровень высокий», то «вероятность утечки средняя». При $c_{13}(x) = 0,25$ функция принадлежности $\mu_{P(x)}$ принимает максимальное значение 0,25.

Аккумуляция представляет собой процесс объединения функций принадлежности, полученных из различных правил, для формирования итогового нечеткого множества выходной переменной (в данном случае – вероятности утечки). Результат данного этапа визуализирован на рис. 3, где отражена совокупная функция принадлежности после агрегации всех релевантных подзаключений.

Таблица 3

Степень истинности для антецедентов правил системы нечеткого вывода

Правило	Антецедент	Степеней истинности
<1>	температура = высокая И уровень = высокий	$\min \{0,00; 0,00\} = 0$
<2>	температура = низкая И уровень = низкий	$\min \{0,00; 0,00\} = 0,00$
<3>	температура = низкая И уровень = средний	$\min \{0,00; 0,25\} = 0,00$
<4>	температура = низкая И уровень = высокий	$\min \{0,00; 0,75\} = 0,00$
<5>	температура = средняя И уровень = высокий	$\min \{0,25; 0,75\} = 0,25$
<6>	влажность = высокая И температура = высокая	$\min \{0,75; 0,75\} = 0,75$
<7>	влажность = низкая И температура = низкая	$\min \{0,00; 0,00\} = 0,00$
<8>	влажность = средняя И температура = средняя	$\min \{0,25; 0,25\} = 0,25$
<9>	влажность = высокая И температура = низкий	$\min \{0,75; 0,00\} = 0,00$
<10>	влажность = высокая И температура = средняя	$\min \{0,75; 0,25\} = 0,25$
<11>	влажность = высокая И уровень = высокий	$\min \{0,75; 0,75\} = 0,75$
<12>	влажность = низкая И уровень = низкий	$\min \{0,00; 0,00\} = 0,00$
<13>	влажность = средняя И уровень = низкий	$\min \{0,25; 0,00\} = 0,00$
<14>	влажность = высокая И уровень = средний	$\min \{0,75; 0,25\} = 0,25$

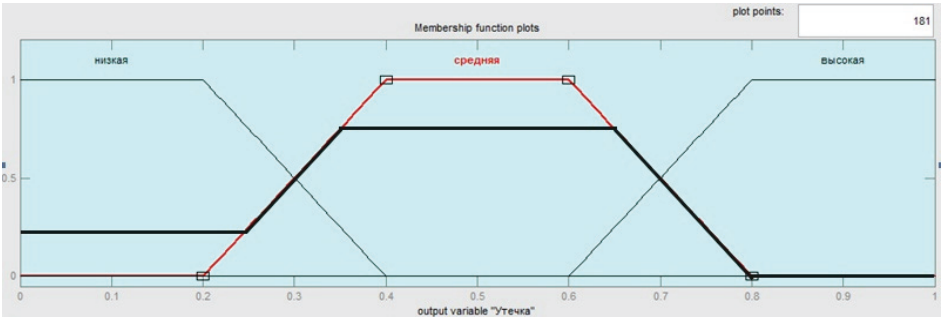


Рис. 3. Зависимость функции принадлежности итоговой вероятности от вероятности утечки

Дефазификация представляет собой критически важный этап обработки нечетких данных, заключающийся в преобразовании агрегированной выходной функции принадлежности $\mu(y)$ в детерминированное значение $y^* \in Y$, где Y – универсальное множество выходной переменной. В контексте рассматриваемой задачи управления технологическим процессом, объектом дефазификации выступает лингвистическая переменная «Вероятность утечки» с терм-множеством $T = (\text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»})$.

Далее приведем формализацию методов дефазификации в виде метода центра тяжести, метода центра площади, методов максимизации. Метод центра тяжести может быть представлен для непрерывной функции

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu(y) dy},$$

где $y_{\min}, y_{\max}$ – границы носителя функции принадлежности; $\mu(y)$ – агрегированная функция принадлежности выходной переменной.

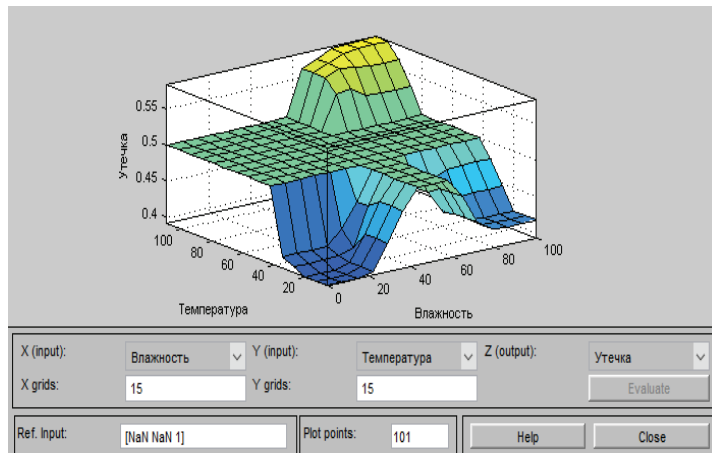
Метод центра площади может быть представлен для непрерывной функции

$$y^* = \arg \min_y \left| \int_{y_{\min}}^y \mu(y) dy - \int_y^{y_{\max}} \mu(y) dy \right|.$$

Для данной задачи оптимальным методом является метод центра тяжести, который обеспечивает минимальную среднеквадратичную ошибку, физическую интерпретируемость результатов, а также устойчивость к параметрическим возмущениям.

По результатам нечеткого логического вывода получена поверхность «входы-выход», отображающая динамику вероятности возникновения того или иного показателя (рис. 4).

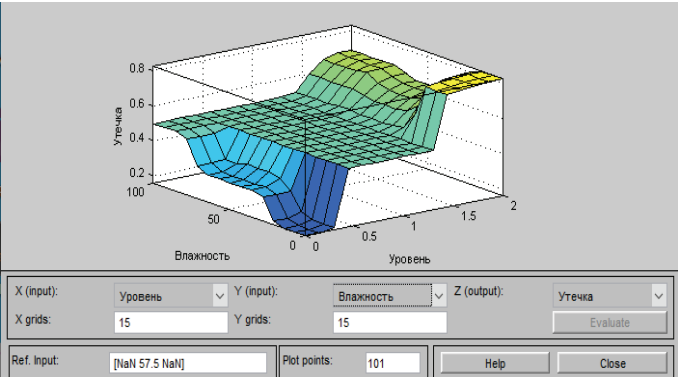
Дадим оценку разработанной системы нечеткого вывода для задачи автоматического контроля обнаружения утечек (рис. 5, а). Здесь рассматривается минимальный случай возможности утечки, когда температура воздуха 20 °С, влажность в камере составляет 20 %, а уровень воды находится на отметке 0,2 м. После ввода этих значений MATLAB выполняет процедуру нечеткого вывода на основе разработанной модели. В результате система выдает значение выходной переменной «вероятность утечки», равное 0,161. Это значение отправляется лицу, принимающему решения, для дальнейшей обработки. Также рассматривается максимальный случай возможности утечки, когда температура воздуха 100 °С, влажность в камере составляет 100 %, а уровень воды находится на отметке 2 м (рис. 5, б). В результате система выдает значение выходной переменной «вероятность утечки», равное 0,839. Это значение также отправляется лицу, принимающему решения, для дальнейшей обработки.



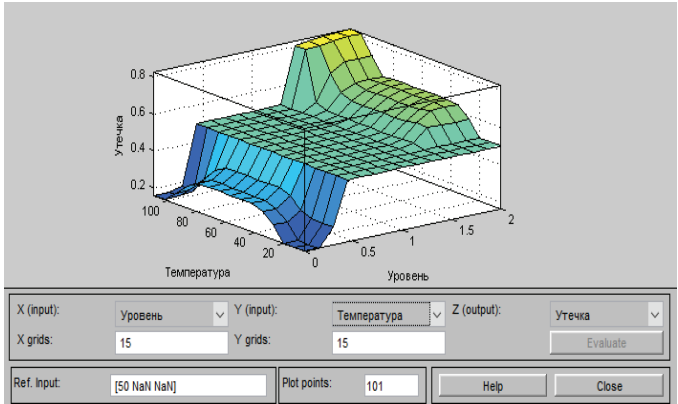
а)

Рис. 4. Зависимости вероятности утечки (начало):

а – от температуры и влажности воздуха при фиксированном уровне воды

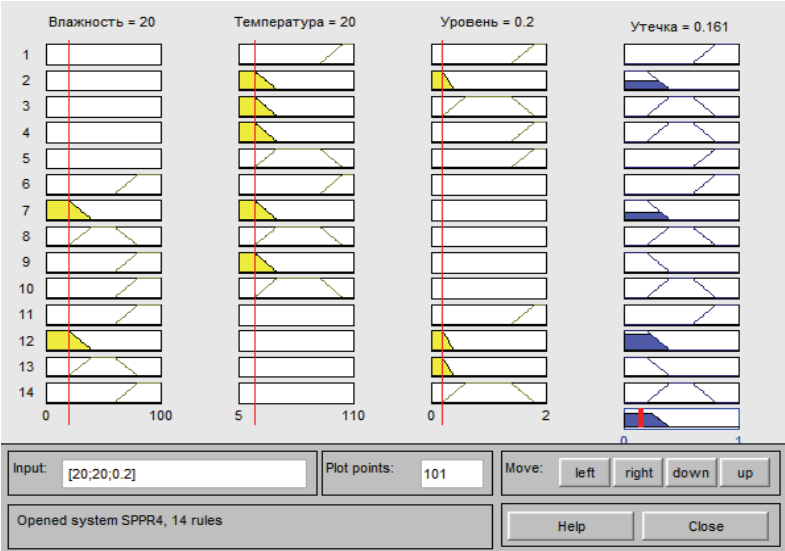


б)



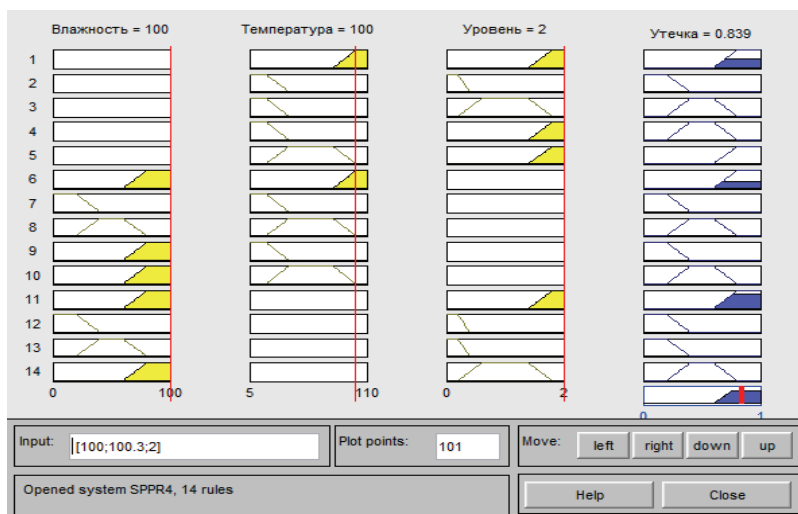
в)

Рис. 4. Зависимости вероятности утечки (окончание):
 б – от влажности воздуха и уровня воды при фиксированной температуре воздуха
 в – от температуры воздуха и уровня воды при фиксированной влажности воздуха.



а)

Рис. 5. Дефазификация с использованием метода тяжести при минимальной утечке в тепловой камере(а) (начало)



б)

Рис. 5. При максимальной утечке (б) (окончание)

Программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода позволяет просматривать поверхность системы нечеткого вывода и визуализировать графики зависимости выходных переменных от отдельных входных величин.

Заключение

Проведенное исследование выявило существенную вариативность реализации этапов нечеткого логического вывода, детерминируемую выбором типа функций принадлежности, операторов агрегирования, а также методов дефазификации. Для задач диагностики технологических процессов алгоритм Мамдани, продемонстрировал преимущества за счет прозрачной интерпретации лингвистических правил, устойчивости к неполноте входных данных и возможности интеграции с экспертной системой.

Список литературы

1. Корпусов, Д. В. Повышение надежности теплоснабжения при эксплуатации тепловой сети / Д. В. Корпусов, А. А. Балашов, А. П. Королев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 594–604. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.594-604
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612529 Российская Федерация. Методика расчета показателей надежности тепловой сети : № 2024610082 : заявл. 10.01.2024 : опубл. 01.02.2024 / А. А. Балашов, Д. В. Корпусов ; заявитель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».
3. Агиней, Р. В. Разработка подходов применения аппарата нечетких множеств в задаче обнаружения утечки в трубопроводе / Р. В. Агиней, К. И. Шмаков, А. С. Казак // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 11(604). – С. 5 – 13. doi: 10.33285/2782-604X-2023-11(604)-5-13
4. Афанасьева, Т. В. Концептуальная модель гибридной системы анализа нечетких временных рядов / Т. В. Афанасьева, С. Г. Валеев, Н. Г. Ярушкина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2008. – № 4-2(14). – С. 85–90.

Development of Approaches for Fuzzy Set Methods to Detect Leaks in a Heat Chamber of a Supply System

© A. A. Balashov¹✉, D. V. Korpusev²

¹ Department of Energy Supply and Heat Engineering, balashovalexei@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russian Federation;

² Municipal Unitary Enterprise "Tambovteploservis", Tambov, Russian Federation

Keywords: fuzzy logic; heat chamber; heat network; leak; Matlab.

Abstract: The main parameters that significantly influence the reliability of a heat supply system are the probability of failure-free operation and the availability factor, which depend on the operability of heat chambers in heat networks. Leak monitoring in thermal chambers depends on many factors, including indoor air temperature and humidity, and water level. Principles for constructing leak monitoring in thermal chambers based on fuzzy logic have been developed, along with a fuzzy logic model implemented using MATLAB software and based on the Mamdani algorithm. This monitoring method allows for the detection of a coolant leak in a thermal chamber based on parameters such as indoor air temperature, humidity, and water level.

References

1. Korpusev D.V., Balashov A.A., Korolev A.P. [Improving the reliability of heat supply during operation of a heating network], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 594–604. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.594-604 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Balashov A.A., Korpusev D.V. *Metodika rascheta pokazateley nadezhnosti teplovoy seti* [Methodology for Calculating Heating Network Reliability Indicators], Russian Federation, 2024, Certificate No. 2024612529 (In Russ.)
3. Aginey R.V., Shmakov K.I., Kazak A.S. [Development of approaches for applying the fuzzy set apparatus to the problem of pipeline leak detection], *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the fuel and energy complex], 2023, no. 11(604), pp. 5-13. doi: 10.33285/2782-604X-2023-11(604)-5-13 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Afanas'yeva T.V., Valeyev S.G., Yarushkina N.G. [Conceptual Model of a Hybrid System for Fuzzy Time Series Analysis], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2008, no. 4-2(14), pp. 85-90. (In Russ., abstract in Eng.)

Entwicklung von Ansätzen zur Anwendung von Fuzzy-Set-Methoden bei der Lecksuche in der Wärmekammer eines Wärmeversorgungssystems

Zusammenfassung: Die Zuverlässigkeit eines Heizsystems wird maßgeblich durch die Ausfallrate und den Verfügbarkeitsfaktor beeinflusst, welche wiederum von der Funktionsfähigkeit der Wärmespeicher in Heiznetzen abhängen. Die Überwachung von Leck in Wärmespeichern ist von zahlreichen Faktoren abhängig, darunter Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wasserstand. Es sind Prinzipien für die

Leckage Überwachung in Wärmespeichern auf Basis von Fuzzy-Logik entwickelt und ein Fuzzy-Logik-Modell implementiert, das auf dem Mamdani-Algorithmus basiert und mit MATLAB realisiert worden ist. Dieses Überwachungsverfahren ermöglicht die Erkennung von Kühlmittleckagen in Wärmespeichern anhand von Parametern wie Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wasserstand.

Élaboration d'approches d'application de l'appareil à ensembles flous dans la tâche de la détection de fuite dans la chambre thermique du système d'alimentation en chaleur

Résumé: Les principaux paramètres qui ont un impact significatif sur la fiabilité du système de chauffage sont la probabilité de disponibilité et le facteur de disponibilité, qui dépendent de la capacité de fonctionnement des chambres thermiques sur les réseaux thermiques. Le contrôle des fuites dans les chambres thermiques dépend de nombreux facteurs, à savoir des paramètres tels que la température et l'humidité de l'air intérieur, le niveau d'eau. Sont élaborés des principes pour la construction du contrôle des fuites dans la chambre thermique basés sur la logique floue, un modèle de logique floue réalisé à l'aide du système de programme MATLAB, basé sur l'algorithme de Mamdani. La méthode de contrôle considérée permet de déterminer la situation d'urgence en cas de fuite du liquide de refroidissement dans la chambre thermique, par des paramètres tels que la température et l'humidité de l'air intérieur, ainsi que le niveau d'eau.

Авторы: *Балашов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Корпусов Дмитрий Владимирович* – ведущий инженер участка допуска и контроля отдела режимов службы сбыта, МУП «Тамбовтеплосервис», Тамбов, Россия.