

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ ХЛОРАГЕНТА

А.И. Юхно, Н.К. Плуготаренко (ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»)

Для автоматизации процесса дозирования хлорагента на основе оценки качества питьевой воды применялись интеллектуальные методы обработки данных. Нейросетевая модель использована для прогнозирования концентрации хлорорганических соединений, образующихся в процессе хлорирования воды. Проведена оценка рисков здоровью населения в результате обеззараживания воды, а также рассчитаны пороговые значения концентраций хлорорганических соединений для оценки канцерогенного риска. В ходе проводимых исследований были разработаны нечеткие индексы качества воды на основе системы нечеткого вывода Мамдани. На основе трапециевидальных функций принадлежности разработан алгоритм хлорирования воды для безопасного водопотребления. Разработанный алгоритм применен для дозирования хлорагента и поддержания качества воды¹.

Ключевые слова: дозирование, хлорирование, канцерогенный риск, нечеткая логика, прогнозирование.

Введение

Традиционные подходы к процессу обеззараживания питьевой воды основаны исключительно на соответствии одного или нескольких показателей качества воды установленным нормативным стандартам. Неточности в дозировке хлорагента в процессе водоподготовки определяются в основном посредством контроля концентрации остаточного хлора. Применяемые на данный момент подходы, используемые при обеззараживании питьевой воды, не принимают во внимание динамику остаточного хлора и степень соответствия или несоответствия предельно допустимому уровню канцерогенного риска для здоровья населения при употреблении воды, подвергшейся обеззараживанию. Это может привести к вводящим в заблуждение или неточным данным оценки параметров качества воды, используемым в процессе дозирования хлорагента.

В этом исследовании предлагается дозирование хлорагента при обеззараживании питьевой воды, основанное на оценке риска для здоровья населения. Около 20% инфекционных заболеваний передается перорально через питьевую загрязненную воду [1], поэтому важной задачей является подбор оптимальной дозы дезинфицирующего агента, обеспечивающей надлежащий бактерицидный эффект, но не ведущей к образованию побочных продуктов хлорирования. Анализ образующихся при обеззараживании воды хлорорганических соединений базируется исключительно на хроматографических методах, которые не относятся к разряду экспресс-анализов. Моделирование образования хлорорганических соединений в питьевой воде является актуальной темой для исследований и дает достоверную информацию для прогнозирования канцерогенных рисков в питьевой воде. Актуальным является анализ воды в режиме ре-

ального времени с использованием нейронных сетей, которые способны прогнозировать концентрацию хлорорганических соединений (ХОС). Данный подход позволит произвести количественную оценку последствий, связанных с сезонными и специфическими для конкретного региона изменениями в физико-химических параметрах качества воды в системе питьевого водоснабжения, и обеспечить оперативное принятие решений.

Применение нечеткой логики и искусственных нейронных сетей для задач управления автоматизированными системами является частой темой исследований последних лет [2, 3]. Нечеткое моделирование используется для устранения неточностей и неопределенностей, присутствующих в процессе водоподготовки [4–6]. Для управления процессом дезинфекции природных вод важно учитывать канцерогенный риск [7, 8].

Основной задачей данной работы является разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления дозированием хлорагента, построенной с использованием аппарата нечеткой логики и нейросетевого моделирования и направленной на минимизацию канцерогенного риска для здоровья населения. В качестве объекта управления выбран технологический процесс хлорирования воды, по-

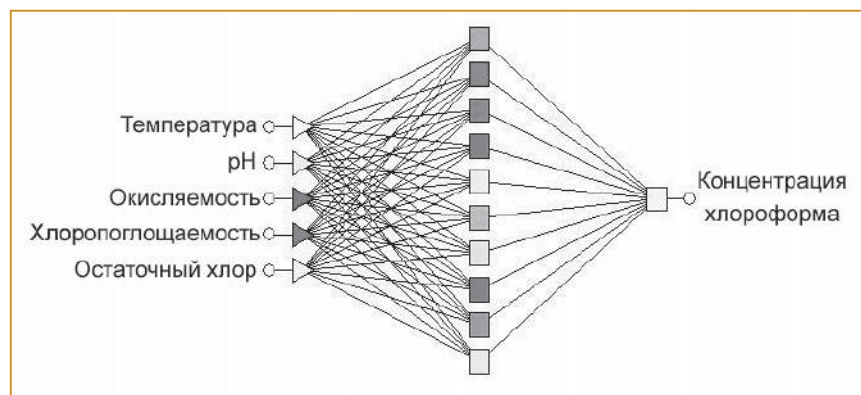


Рис. 1. Архитектура нейронной сети, прогнозирующей содержание хлороформа в питьевой воде

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00489.

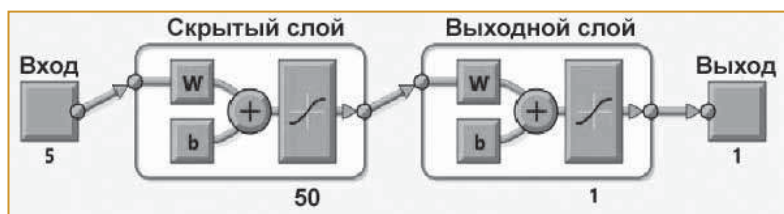


Рис. 2. Конфигурация нейронной сети в программной среде MATLAB

скольку для него характерна сложность алгоритмизации управления и субъективность оператора.

Построение нейросетевой модели

В программной среде MATLAB с использованием пакета Deep Learning Toolbox была построена нейросетевая модель, которая позволяет предсказывать содержания ХОС в питьевой воде на основе следующих факторов: рН, температура, перманганатная окисляемость, хлорпоглощаемость и остаточный хлор [9]. Архитектура нейронной сети, прогнозирующей содержание хлороформа в питьевой воде, приведена на рис. 1. Наилучшим оказался тип feed-forward backprop с прямой передачей сигнала и с обратным распространением ошибки. Оптимальной при 50 нейронах оказалась функция LEARNPQDM, реализующая процесс обучения. В качестве функций

активации использовалась дифференцируемая функция TANSIG. Для оптимизации использовался метод Левенберга-Марквардта. На рис. 2 приведены фрагменты выходного файла MATLAB, характеризующие параметры сети.

При разработке модели использовались данные, собранные в результате трехлетнего мониторинга качества питьевой воды на станциях водоподготовки. Объем выборки составил 6556 измерений. Сравнительный анализ точности прогнозирования нейросети показал, что модель имеет достаточно высокую точность, ошибка прогнозирования составила $< 5\%$. Коэффициент корреляции контрольной выборки, составляющей 25% от общего объема данных, с прогнозируемыми сетью результатами превысил 0,8. Полученная в результате моделирования нейросетевая модель была встроена в разработанную систему управления дозированием хлорагента на станциях водоподготовки.

Разработка системы управления процессом дозирования хлорагента на базе нечеткой логики

Для обеспечения взаимодействия между оператором и разработанной системой управления дозированием хлорагента использовалось программное обе-

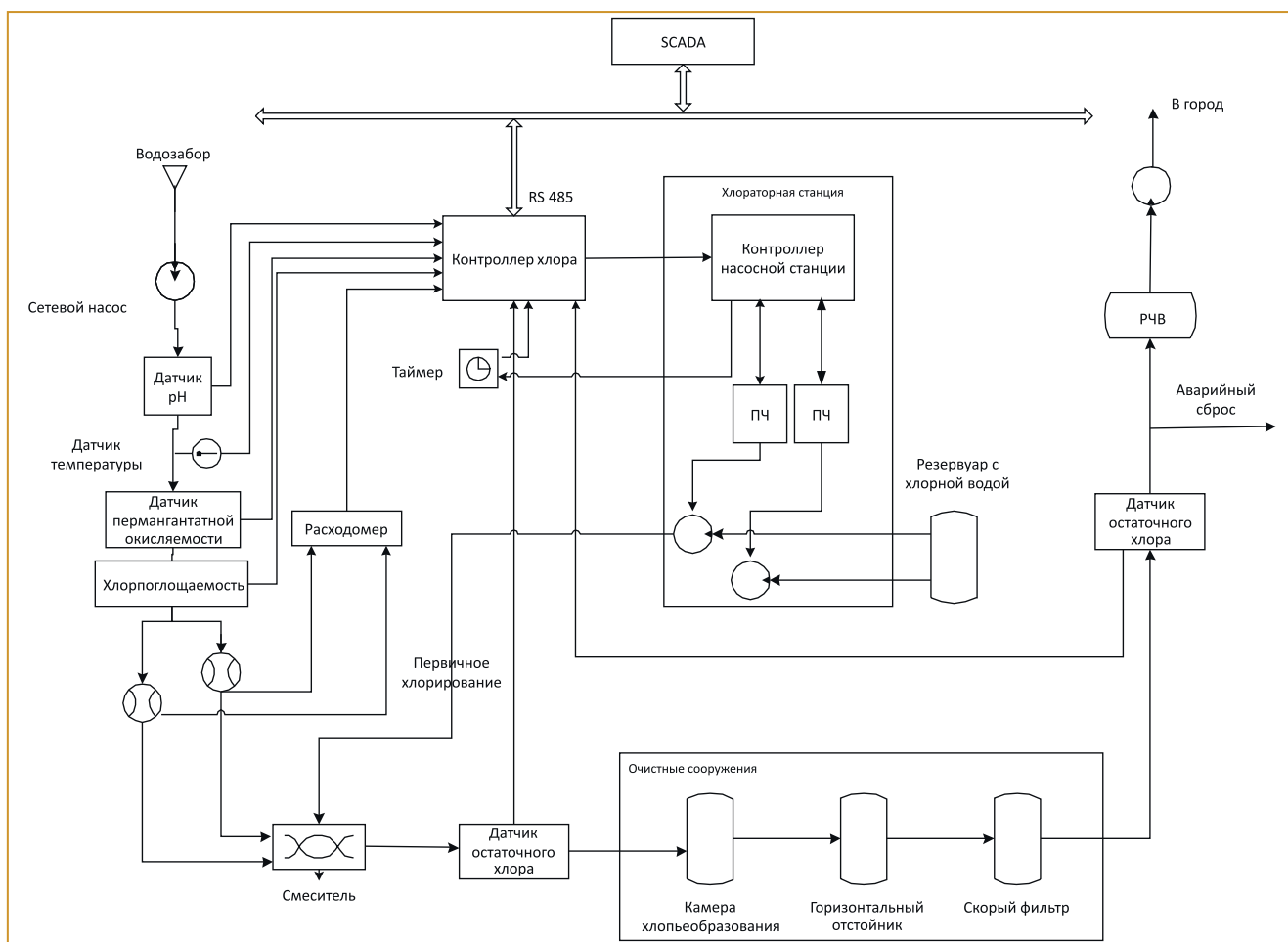


Рис. 3. Схема системы управления процессом обеззараживания с автоматизированным дозированием хлора

Таблица 1. Статистические данные по скорости изменения остаточного хлора с разбивкой по подмножествам

Название подмножества	Нулевая	Низкая-	Низкая +	Высокая+	Высокая-
Число значений в диапазоне, ед.	7396	779	654	320	351

Таблица 2. Соответствие концентрации хлороформа уровням канцерогенного риска

Диапазон канцерогенного риска	Уровень риска	Концентрации хлороформа соответствующие уровню риска, мг/дм ³
$\leq 10^{-6}$	Пренебрежимо малый	0...0,004
$10^{-6} < RC < 10^{-4}$	Предельно допустимый	0,004...0,082
$10^{-4} < RC < 10^{-3}$	Для профессиональных групп	0,082...0,93
$RC \geq 10^{-3}$	Неприемлемый	> 0,93

спечение SCADA «Круг-2000». SCADA — собирает информацию о технологическом процессе, обеспечивает интерфейс с оператором, сохраняет историю процесса и осуществляет автоматическое управление процессом. На рис. 3 показана функциональная схема системы управления процессом обеззараживания питьевой воды с использованием SCADA-системы.

Управление процессом дозирования хлорагента с использованием автоматизированной системы (рис. 3.) осуществляется таким образом: при помощи датчиков pH, перманганатной окисляемости, температуры в режиме реального времени осуществляется контроль природной воды по данным показателям. Измерение показателя хлорпоглощаемости производится вручную и вводится оператором. Полученные значения параметров качества воды поступают на «Контроллер», откуда через преобразователь частоты (ПЧ) подаётся сигнал о необходимой дозе хлорагента. Вода из источника поступает на «Смеситель», где подаются реагенты. После смесителя датчик измеряет содержание в воде остаточного хлора, значение полученной концентрации также направляется на «Контроллер», на который помимо того направляются и показания «Расходомеров», отображающих объемы поступающей воды. Далее вода проходит через «Очистные сооружения», включающие все необходимые этапы очистки питьевой воды, отраженные на схеме процесса. Перед поступлением в резервуар чистой воды (РЧВ), с последующим выходом из очистных сооружений питьевая вода подвергается вторичной проверке по показателю «остаточный хлор». В случае выхода данного показателя за пределы нормируемого значения в системе обеззараживания предусмотрен аварийный сброс.

Контроллер предполагает реализацию алгоритма нечеткой логики Мамдани. Модель на основе нечеткой логики работает по следующему принципу: сигналы от датчиков и результаты нейросетевого

моделирования будут фазифицированы, обработаны, дефазифицированы и полученные данные в виде сигналов поступят на управляющий блок дозатора хлора, который будет менять дозировку хлорагента в соответствии со значением функции принадлежности входных параметров. В качестве входных лингвистических переменных были выбраны концентрация остаточного хлора, скорость изменения остаточного хлора и концентрация хлороформа, прогнозируемая разработанной нейронной сетью. Выходным параметром выбран коэффициент дозы хлорагента. Под коэффициентом понимается регулирующий параметр, на который умножается средняя доза, полученная на предыдущем шаге в ходе анализа динамики приведенной дозы хлора. Приведенной дозой называем отношение применяемой дозировки хлорагента к объему обеззараживаемой воды.

Разработка системы управления дозированием хлорагента осуществлялась средствами MATLAB и входящих в него подсистем Simulink и Fuzzy Logic Toolbox.

Нечеткая переменная «Концентрация остаточного хлора» характеризуется областью определения $[0,6; 1,5]$. Данное множество включает нечеткие подмножества: «Высокая», «Низкая», и «Средняя», характеризующие варианты поведения моделируемого параметра. Разделение переменной на подмножества определялось относительно оптимального значения концентрации остаточного хлора находящегося в пределах 0,8...1,2 мг, в соответствии с действующими нормативными документами, регулирующими качество питьевой воды. Концентрация может находиться ниже или выше данного предела, в связи с этим произведено разделение на перечисленные выше три нечетких подмножества.

Нечеткая переменная «Скорость изменения концентрации остаточного хлора» характеризуется областью определения $[-0,8; 0,8]$. Данное множество включает нечеткие подмножества: «Высокая+», «Высокая-», «Низкая+», «Низкая-» и «Нулевая», характеризующие варианты поведения моделируемого параметра.

Распределение на подмножество производилось на основании статистических данных по остаточному хлору, полученных на одной из станций водоподготовки. Скорость изменения параметра была рассчитана, значения представлены в табл. 1.

Нечеткая переменная «Концентрация хлороформа» поделена на три подмножества, определяемых концентрациями, соотносящимися с уровнями канцерогенного риска и проведенным анализом динамики концентрации хлороформа в течение года. Выполнен расчет и установлены концентрации хлороформа для пороговых значений риска, которые позволили оценить входной параметр концентрацию хлороформа с позиции риска для здоровья населе-

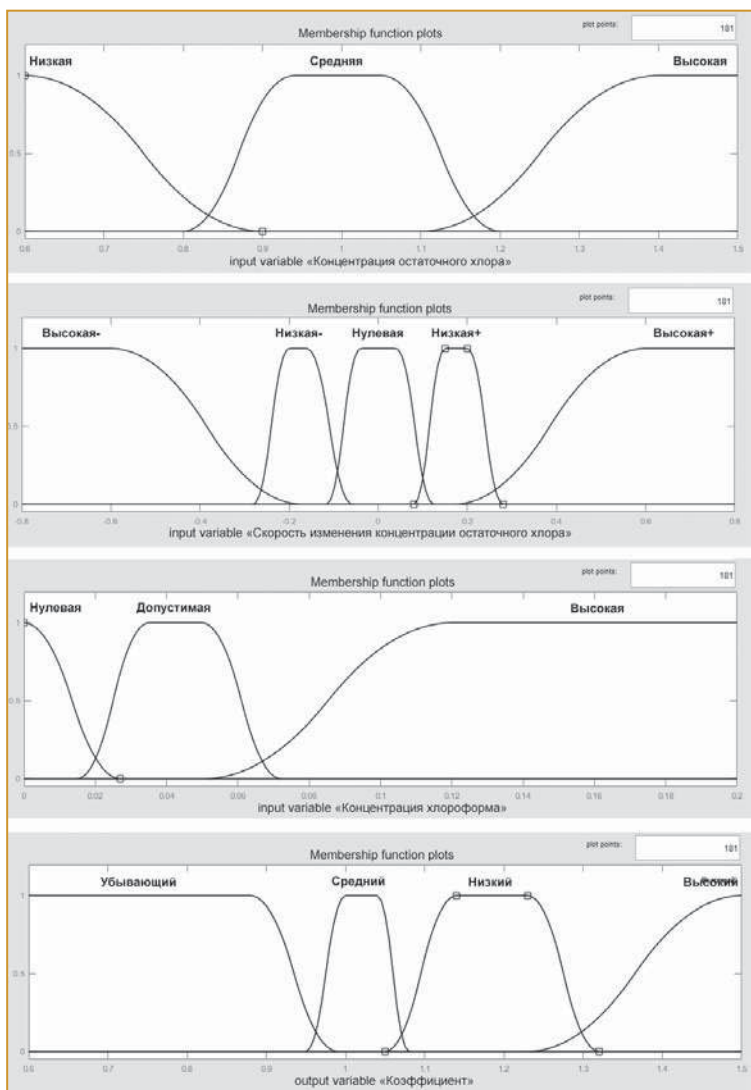


Рис. 4. Функции принадлежности входных переменных и выходного параметра

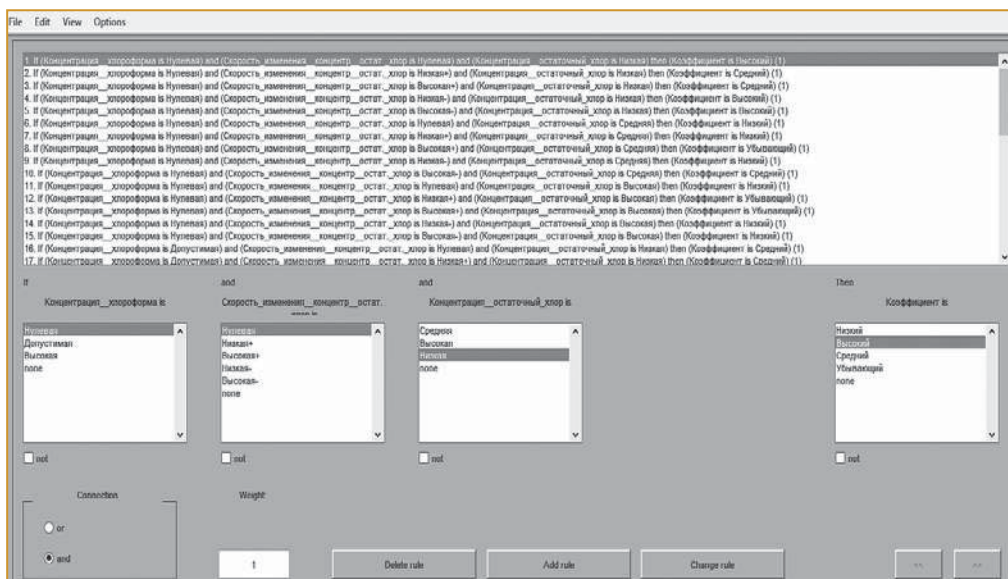


Рис. 5. Лингвистические правила модели дозирования в редакторе правил (Rule Editor) пакета Fuzzy Logic Toolbox

ния (табл. 2). Анализ динамики концентрации хлороформа в течение года показал, что концентрация варьировалась в диапазоне 0,0012...0,018 мг/дм³, превышений предельно допустимой концентрации в течение года не наблюдалось. Однако около 70% от общего числа измерений за год оказались выше пороговой концентрации хлороформа, при которой канцерогенный риск достигает верхней границы приемлемого риска 10⁻⁶ и подлжит постоянному контролю.

Для описания подмножества «Нулевая» переменной «Концентрация хлороформа» используется функция zmf, которая применяется для задания невозрастающих функций принадлежности с насыщением. Подмножество переменной «Допустимая» можно количественно охарактеризовать при помощи функции трапецеидальной принадлежности trimf в виде криволинейной трапеции. Подмножество переменной «Высокая» характеризуется функцией принадлежности smf, которая применяется для задания неубывающих функций принадлежности с насыщением. Концентрации хлороформа, соответствующие этому подмножеству, требуют проведение мероприятий по снижению риска. В связи с тем, что объектом потребления питьевой воды является население, диапазон риска $RC \geq 10^{-4}$ уже считается неприемлемым, и выше этого значения предусмотрен аварийный сброс.

Выходная переменная «Коэффициент» дозы хлорагента характеризуется областью определения [0,6; 1,5]. Данное множество включает нечеткие подмножества: «Высокий», «Средний», «Низкий» и «Убывающий», характеризующие

варианты поведения моделируемого параметра. Задавая параметр «Коэффициент» дозы хлорагента в виде нечеткой переменной установим, что отклонение данной переменной в пределах единицы и ее окрестностей характеризуется «Средним» коэффициентом дозы, то есть применяемая доза при текущих параметрах является оптимальной. В зависимости от состояния качества воды и показаний входных нечетких переменных системы нечеткого вывода повышение дозы хлора описывается

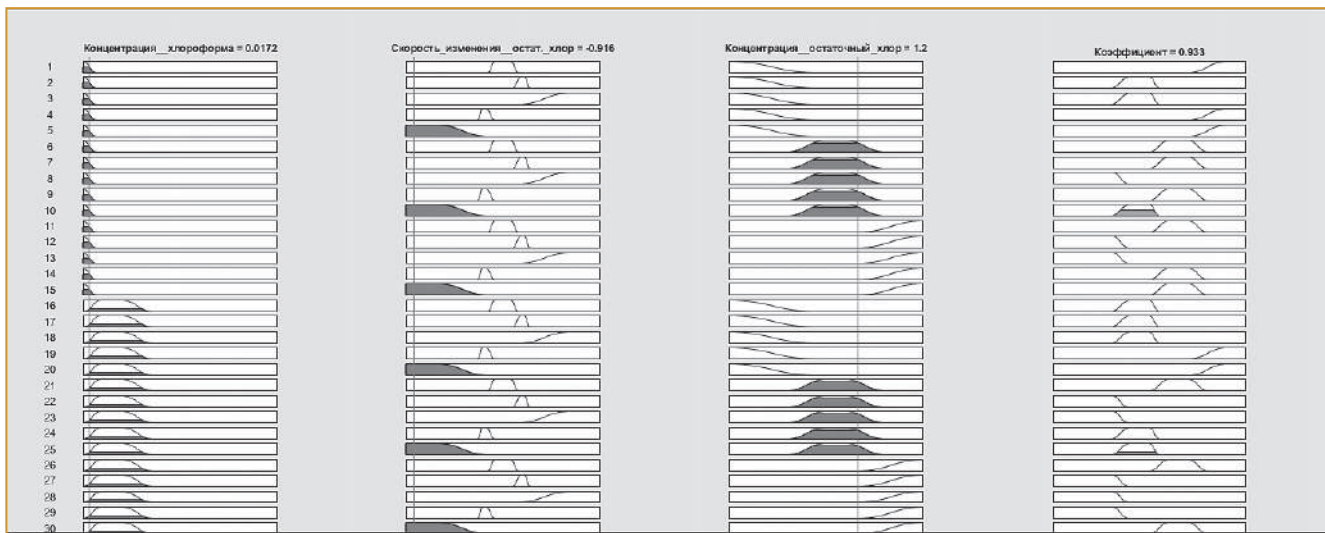


Рис. 6. Графическое представление правил нечеткого вывода

подмножествами «Низкий» и «Высокий» коэффициент дозирования. При необходимости снизить дозу, применяемую на предыдущем шаге, в соответствии с состоянием системы будет применен «Убывающий» коэффициент дозирования. Нечетким лингвистическим переменным была задана количественная форма при помощи функций принадлежности, представленных на рис. 4.

Результаты и их обсуждение

Главным преимуществом нечеткого подхода является формирование числа правил управления в зависимости от числа и значений входных переменных регулятора. Сформированный в редакторе правил (Rule Editor) пакета Fuzzy Logic Toolbox список правил, приведен на рис. 5.

Графическое представление правил нечеткого вывода представлено на рис. 6. Графический вывод правил служит для общего анализа адекватности нечеткой модели, позволяя оценить влияние изменения значений входных нечетких переменных на значение выходной нечеткой переменной.

В ходе анализа системы были исследованы крайние значения входных параметров исследуемой системы и оценена реакция выходного параметра. При нахождении системы в условиях нулевой концентрации хлороформа, нулевой скорости изменения остаточного хлора и низкой концентрации остаточного хлора значение коэффициента равно 1,4. Значение коэффициента в противоположном крайнем состоянии модели, то есть при высокой концентрации хлороформа, высокой отрицательной скорости изменения остаточного хлора и высокой концентрации остаточного хлора равно 0,673. Выяснено, что система функционирует согласно заданной системе нечетких правил. Полученный коэффициент дозы хлора коррелирует с добавкой хлора, вводимой при вторичном хлорировании в традиционных методах обеззараживания, но исключает перехлорирование.

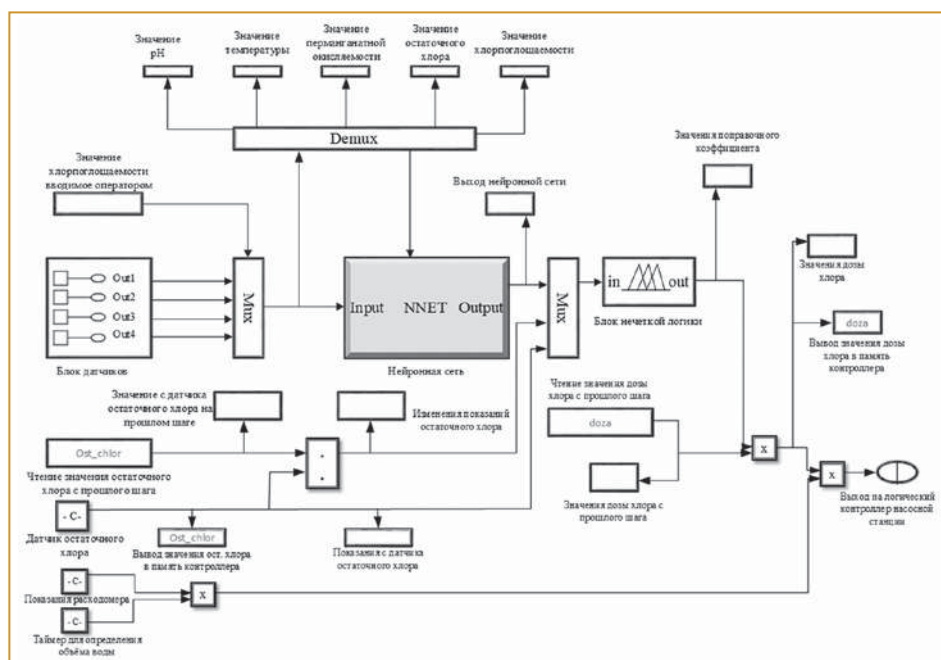


Рис. 7. Блок-схема алгоритма автоматизированной системы управления дозированием хлорагента

Разработанная автоматизированная система управления дозированием хлорагента была реализована в виде алгоритма с использованием графической среды имитационного моделирования Simulink. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 7.

Заключение

Разработанная автоматизированная система управления дозированием хлорагента на базе нечеткой логики позволит стабилизировать подачу хлора, увеличить эффективность технологического процесса, качество управления дозированием хлорагента на станциях водоподготовки, а также позволит избежать перехлорирования питьевой воды и обеспечить более безопасное водопотребление благодаря непрерывному контролю канцерогенного риска здоровью населения.

Алгоритм на базе аппарата нечеткого вывода для регулирования дозирования хлора позволяет уйти от этапа вторичного хлорирования в процессе водоподготовки, поэтому делает его предпочтительней по сравнению с типовыми системами регулирования. Этот эффект достигается за счет учета динамики остаточного хлора на контроллере дозирования.

Список литературы

1. Kavi Priya, S., Shenbagalakshmi, G., Revathi, T. Applied fuzzy heuristics for automation of hygienic drinking water supply system using wireless sensor networks // Journal of Supercomputing. 2018. April. pp. 1-27.
2. Lin C.J., Chen C.H., Lee C.Y. A TSK-Type Quantum Neural Fuzzy Network for Temperature Control // International Mathematical Forum. 2006.1. pp. 853-866.
3. Satrio Budi Prakoso¹, Suprihanto Notodarmoj Analysis of Drinking Water Supply System Improvement Using Fuzzy AHP (Case Study: Subang Local Water Company) // MATEC Web of Conferences. 2018. pp 2-12.
4. Bereskie, T., Haider, H., Rodriguez, M.J., Sadiq, R. Small drinking water systems under spatiotemporal water quality variability: a risk-based performance benchmarking framework // Environmental Monitoring and Assessment. 2017. № 464. pp 189.
5. Azimi S., Azhdary Moghaddam M., Hashemi Monfared S. A. Prediction of annual drinking water quality reduction based on Groundwater Resource Index using the artificial neural network and fuzzy clustering // Journal of Contaminant Hydrology. 2019. V. 220. pp 6-17.
6. Hosseini-Moghari, S.-M., Ebrahimi, K., Azarnivand, A. Groundwater quality assessment with respect to fuzzy water quality index (FWQI): an application of expert systems in environmental monitoring // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 74. Issue 10. pp 7229-7238.
7. Михайлова Д.Л., Кольдибекова Ю.В. Оценка воздействия хлороформа при поступлении в организм с питьевой водой на состояние здоровья детей // Вестник Перм. ун-та. Сер.: Биология. 2012. № 2. С. 85-88.
8. Кириченко В.Е., Первова М.Г., Пашкевич К.И. Галогенорганические соединения в питьевой воде и методы их определения // Российский химический журнал. 2002. т. XLVI. № 4. с. 18-27
9. Южно А.И., Плуготаренко Н.К. Анализ образования хлорпроизводных соединений в питьевой воде // Технологии техносферной безопасности. 2018. № 3 (79). С. 28-35.
10. Icaga, Yilmaz. Fuzzy Evaluation of Water Quality Classification // Ecological Indicators. 2007. № 7. pp 710-718.

Южно Александра Игоревна — аспирант, Плуготаренко Нина Константиновна — канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой техносферной безопасности и химии института нанотехнологий, электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет». E-mail: a.bachmackaja@gmail.com plugotarenkonk@sfedu.ru

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТРЕНАЖЕРА С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИММЕРСИВНОЙ СРЕДОЙ**А.Е. Глазырин (ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»)**

Рассмотрена возможность повышения эффективности профессиональной подготовки операторов при использовании тренажеров с интеллектуальной иммерсивной средой (ИС). Предложена методика двухуровневого проектирования интеллектуальной ИС тренажера: на нижнем уровне выбираются простейшие действия оператора и специальные тесты для оценки производительности его работы; на верхнем - показатели производительности и параметры ИС, влияющие на сложность выполнения задачи. Методика предусматривает наличие в тренажере обратной связи вида «результат-изменение параметров задачи». Разработан алгоритм индивидуальной генерации профессиональной программы подготовки оператора, учитывающий значения показателей производительности действий оператора. Алгоритм позволяет формировать индивидуальную программу профессиональной подготовки и учитывает производительность оператора на основе изменения параметров трудоемкости. Экспериментальные результаты подтвердили целесообразность применения алгоритма для тренажеров транспортно-технологических машин¹.

Ключевые слова: иммерсивная среда, нечеткая модель, профессиональная подготовка, оператор, тренажер, генетический алгоритм.

Введение

Для повышения эффективности профессиональной подготовки в тренажеростроении часто используются иммерсивные технологии² [1], так как все действия в иммерсивной среде (ИС) могут быть связаны с действиями в реальном мире, при этом сама ИС безопасна для человека. Так, в [2] рассмотрены примеры использования ИС для отработки пространственных

заданий, в [3] — для тренировки памяти и развития пространственного мышления. Отдельного внимания заслуживает роль ИС в наработке моторных навыков, а также симуляции выполнения точных манипуляций в чрезвычайных ситуациях.

Однако на сегодняшний день отсутствуют способы оценки эффективности действий операторов в ИС, что создает трудности при разработке методики

¹ Результаты исследования получены при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 25.1095.2017/4.6.

² Иммерсивные технологии или технологиями расширенной реальности включают виртуальную и дополненную реальность, а также 360°-видео. Они обеспечивают эффект полного или частичного присутствия человека в альтернативном пространстве.