

гидрология. – 2011. – № 2. – С. 74–82.

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год [электронный ресурс]. – URL: <http://www.meteorf.ru> (дата обращения 01.06.12).

4. Гришанин К. В., Дегтярев В. В., Селезнёв В. С. Водные пути. – М.: Транспорт, 1986. – 400 с.

5. Основные показатели сельского хозяйства в России в 2010 году. – М.: Статистика России, 2011. – 68 с.

6. РусГидро [электронный ресурс]. – URL: [www.rushydro.ru](http://www.rushydro.ru) (дата обращения 01.06.12).

Материал поступил в редакцию 18.06.12.

*Алексеевский Николай Иванович, доктор географических наук, профессор*  
E-mail: [n\\_alex50@mail.ru](mailto:n_alex50@mail.ru)

*Фролова Наталья Леонидовна, доктор географических наук, доцент*  
E-mail: [frolova\\_nl@mail.ru](mailto:frolova_nl@mail.ru)

*Гречушников Мария Георгиевна, кандидат географических наук*  
E-mail: [allavis@mail.ru](mailto:allavis@mail.ru)

*Пахомова Ольга Михайловна, кандидат географических наук*  
E-mail: [olpah@mail.ru](mailto:olpah@mail.ru)

УДК 502/504:628.17:004. 896

**А. Б. СОРОКИН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

*Рассматриваются вопросы моделирования и применения нечеткой логики для процесса управления термостатическим смесителем и насосной станцией. Цель – повысить эффективность функционирования водоразборной арматуры и насосных станций.*

*Нечеткая логика, фаззификация, нечеткие правила, дефаззификация.*

*There are considered problems of simulation and application of fuzzy logic for the control process of the thermostatic mixer and pump station. The aim is to increase the efficiency of functioning of hydrant fittings and pump stations.*

*Fuzzy logic, fuzziness, fuzzy rules, defuzziness.*

Экономия воды является неотъемлемой частью комплекса мероприятий, направленных на сокращение затрат для оплаты коммунальных услуг. Меры по обеспечению экономии воды включают в основном установление счетчиков расхода. Культуру потребления воды стараются повысить либо повышением тарифов, либо автоматизацией исполнительных устройств.

В таких автоматизированных системах управления возникает множество ситуаций, определяющих текущее состояние объекта управления и проблемной среды. Для обнаружения ситуаций и принятия управленческих решений используется ситуационный подход. При этом под проблемной средой следует понимать часть внешней среды, с которой взаимодействует автоматизированная система управления. С помощью системы управ-

ления проводится оценка текущего состояния и осуществляется ее формирование. Затем информация передается в анализатор, где определяется, насколько данная ситуация близка по своему содержанию к целевой ситуации. При этом, если целевая и текущая ситуации равны по содержанию, никаких мероприятий в системе управления не проводится. В противном случае информация о текущей ситуации передается в блок вывода решений. Находится соответствующий ей класс ситуаций и определяются управленческие мероприятия, позволяющие перевести систему в требуемое состояние.

Использование классических методов для решения задач оптимизации режимов водоснабжения в помещениях зданий и сооружений связано с необходимостью проведения их математического моделирования. Применение большого

количества информационно-измерительных средств и систем связано с инсталляцией сложных коммуникаций и необходимостью непрерывного измерения многочисленных параметров, обработки постоянно меняющихся результатов. В связи с этим затраты труда и времени высококвалифицированного персонала весьма велики.

Для реализации нечеткой системы ситуационного управления (НССУ) используется аппарат нечеткой логики, базирующийся на нечетком вербальном описании процесса. Нечеткая логика – прекрасный инструмент для реализации мехатронных систем. Программы просты, лаконичны, могут легко адаптироваться к изменениям, имеют очень простой интерфейс для пользователя. Режимы работы исполнительных устройств могут выбираться и настраиваться системой в зависимости от нужд человека.

Задачи водоснабжения многообразны, в них входят: получение воды из природного источника, улучшение ее качества в соответствии с требованиями потребителей, транспортирование на территорию объекта и подача ко всем заданным точкам отбора. Для выполнения этих задач используется множество систем и устройств, работающих на принципах как линейного, так и нелинейного регулирования. В статье рассматриваются оба типа регулирования. Линейный тип регулирования представлен НССУ смесителем, а нелинейный – НССУ подачи воды насосной станцией.

Проектируемая НССУ смесителем состоит из следующих устройств (рис. 1):

автоматический термостатический смеситель (АТС), внутри которого находится клапан холодной воды, управляющий смешением воды;

датчик напора воды (ДНВ), с которого снимаются показания расхода воды в системе водоснабжения;

датчик температуры (ДТ), внутри которого находится термоэлемент, реагирующий на изменение температуры воды;

труба с горячей водой (ТГВ) – предусмотрен режим температуры воды в местах водоразбора  $+50 \dots +75 \text{ }^\circ\text{C}$  для систем централизованного горячего водоснабжения, присоединенных к «закрытым» системам теплоснабжения (СНиП 2.04.01–85 «Внутренний водопровод и канализация зданий») (выберем  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ );

труба с холодной водой (ТХВ) – предусмотрен режим температуры воды в местах водоразбора в зимний период  $+5 \dots +7 \text{ }^\circ\text{C}$ , в летний период  $+7 \dots +10 \text{ }^\circ\text{C}$  (СНиП 2.04.01–85 «Внутренний водопровод и канализация зданий») (выберем  $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ );

электронный клапан (ЭК), предназначенный для регулирования расхода путем изменения количества проходящей по трубопроводу рабочей среды (воды);

электронный смеситель (ЭС), работающий по принципу фотоэлемента (открывается, когда к нему поднесены руки, и самостоятельно открывает воду с уже заданным напором и необходимой оптимальной температурой).

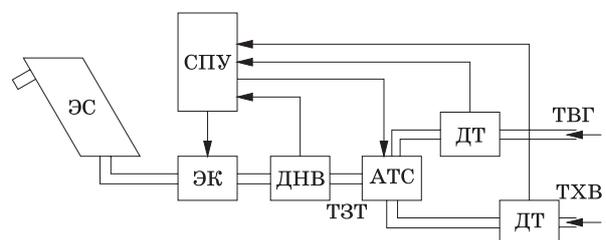


Рис. 1. Схема нечеткой системы ситуационного управления смесителем

На основе сигналов о состоянии системы от ДТ, ДНВ (на рис. 1 они обозначены стрелками) и заданной температуры воды (ЗТВ) от системы пульта управления (СПУ) подается команда АТС и ЭК.

В нечеткой системе управления термостатическим смесителем применяем алгоритм Мамдани. Данный алгоритм описывает несколько последовательно выполняющихся этапов:

первый – формирование базы правил вида «а есть β» с помощью связок «И», «ЕСЛИ – ТО»;

второй – фаззификация – процедура нахождения значений функции принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных;

третий – агрегирование, представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода;

четвертый – активизация в системах нечеткого вывода, представляет собой процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций;

пятый – аккумуляция в системах нечеткого вывода – это процедура

нахождения функции принадлежности выходной переменной.

Дефазсификация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (не нечеткого) значения выходной переменной. Результат дефазсификации определяется по методу центра тяжести.

Алгоритм примечателен тем, что он работает по принципу «черного ящика». На вход поступают количественные значения, на выходе они же. На промежуточных этапах используется аппарат нечеткой логики и теория нечетких множеств. В этом и состоит элегантность использования нечетких систем. Можно манипулировать привычными числовыми данными, но при этом использовать гибкие возможности, которые предоставляют системы нечеткого вывода.

Для реализации алгоритма использовался объектно-ориентированный подход. Исходный код написан на языке программирования ПК «МВТУ» (программный комплекс «Моделирование в технических устройствах»). ПК «МВТУ» – альтернатива зарубежным программным продуктам Simulink, MATRIX, VisSim и др.

Правила блока управления на базе нечеткой логики имеют две входные переменные: температуру смешения и изменение температуры смешения. Переменная температура смешения будет иметь следующие термы: 1 – холодная, 2 – нормальная, 3 – горячая. Переменная изменения температуры смешения будет иметь такие термы: 1 – уменьшается, 2 – не изменяется, 3 – увеличивается. Блок управления клапаном выдаст переменную команду клапана, которая будет иметь следующие термы: 1 – закрывать быстро, 2 – закрывать медленно, 3 – не менять, 4 – открывать медленно, 5 – открывать быстро.

База правил для управления будет иметь следующий вид:

ЕСЛИ температура смешения = высокая, ТО команда клапана АТС = закрывать быстро.

ЕСЛИ температура смешения = нормальная, ТО команда клапана АТС = не изменять.

ЕСЛИ температура смешения = низкая, ТО команда клапана АТС = открывать быстро.

ЕСЛИ температура смешения = нормальная, И изменение температуры смешения = уменьшается, ТО команда кла-

пана АТС = открывать медленно.

ЕСЛИ температура смешения = нормальная И изменение температуры смешения = увеличивается, ТО команда клапана АТС = закрывать медленно.

Для дальнейшей разработки нечеткой системы введем понятие коэффициента смешения.

Коэффициент смешения – соотношение объемов смешанных жидкостей (как правило, воды), вычисляемое по температурам жидкостей до смешения и после него. Применяется в теплотехнике для учета расходов и нагрузок систем отопления и горячего водоснабжения.

Формула для расчета коэффициента смешения следующая:

$$U = (t_1 - t_3) / (t_3 - t_2),$$

где  $U$  – коэффициент смешения;  $t_1$  – температура в подающем трубопроводе теплосети, °С;  $t_2$  – температура в обратном трубопроводе (°С);  $t_3$  – температура в подающем трубопроводе системы отопления или горячей воды (после смешения), °С.

Начальное положение клапана «открыт», тогда пропорции смешения 1:1. Значит, коэффициент смешения  $U = 1$ . Найдем температуру при данном условии:

$$1 = (50 - t_3) / (t_3 - 5); t_3 = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Это будет минимальная температура, которую может выдать термостатический смеситель. Поток холодной воды полностью открыт.

При проектировании применяем функции принадлежности гауссовского типа. Моделируем процесс установки пользователем температуры 36 °С (рис. 2, линия 1).

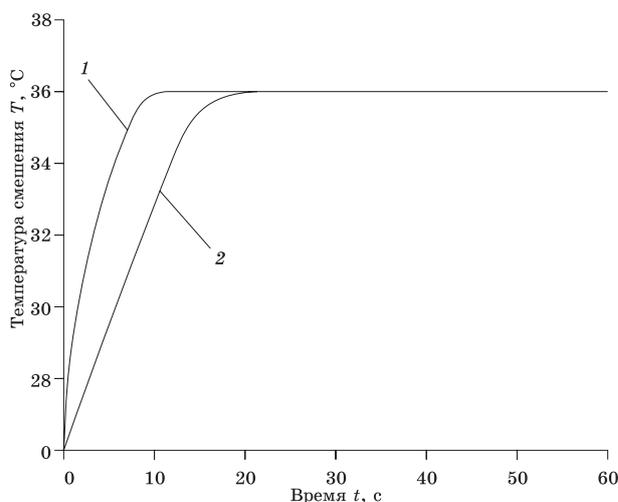


Рис. 2. График установки температуры 36 °С: 1 – нечеткая схема ситуационного управления; 2 – термостатическая схема регулирования

По графику на рисунке 2 можно сделать вывод, что система, основанная на нечеткой логике, быстро адаптируется к изменению целевой ситуации.

Представляет интерес сравнение работы нечеткой системы регулирования воды с традиционными схемами терморегуляции. Сравним ее с термостатом – устройством, которое будет включать подачу горячей воды при понижении температуры некоторого порогового значения. В нашем случае это 27,5 °С. Моделируя данный процесс, получим следующий график (рис. 2, линия 2).

Анализируя графики, нетрудно сделать вывод о том, что нечеткая система ситуационного управления быстрее адаптируется к изменениям температуры в смесителе, чем термостатическая схема регулировки.

Зная максимальный расход (по СНиП 2.04.01–85) для умывальника со смесителем 0,12 л/с и формулу расчетного расхода воды для определенной температуры  $G_{\max} = G_1 + (\alpha \cdot G_2)$ , где  $G_1$  – расход горячей воды;  $G_2$  – расход холодной воды;  $\alpha$  – некоторый безразмерный коэффициент «открытия крана», принимающий значение от нуля (кран закрыт) до единицы (кран полностью открыт), по аналогии можно построить нечеткую систему ситуационного управления для расхода воды.

В трубах водопроводной сети, в каждой точке отбора должен быть заданный режим давления независимо от расхода. Такое условие обеспечивают насосные станции, которые рассчитываются на максимальный режим расхода. В связи с этим требуются средства регулирования, обеспечивающие работу системы при разных режимах расхода.

Наиболее современным является регулирование с помощью преобразователей частоты питающего напряжения, которые позволяют плавно регулировать скорость вращения асинхронного электродвигателя насоса и поддерживать давление в системе водоснабжения при разных режимах расхода воды: при малых – двигатель насоса вращается с минимальной скоростью, необходимой только для поддержания номинального давления, и не расходует лишней энергии; при увеличении расхода воды преобразователь увеличивает скорость вращения электродвигателя, повышая производительность насоса. Данный процесс не является линейным,

так как скорость вращения электродвигателя есть векторная величина и определяется производной угла поворота по времени.

Для осуществления регулирования с использованием преобразователя частоты строится система управления (рис. 3).



Рис. 3. Схема регулирования давления

На вход системы подаются сигналы: задания давления и реального давления. Отклонение между реальным и заданным значениями  $\Delta$  преобразуется ПИ-регулятором в сигнал задания частоты для преобразователя. Под воздействием сигнала задания  $u$  преобразователь изменяет скорость вращения электродвигателя насоса, стремясь привести отклонение между заданным и реальным значением к нулю.

Выходной сигнал ПИ-регулятора  $u(t)$  состоит из суммы пропорциональной  $P$  и интегральной  $I$  составляющих и зависит от ошибки регулирования  $e(t)$  и от интеграла от этой ошибки:

$$u(t) = P + I = K_1 e(t) + K_0 \int_0^t e(t) dt,$$

где  $K_1$  – коэффициент усиления пропорциональной части;  $K_0$  – коэффициент усиления интегральной части.

Пропорциональная составляющая корректирует скорость прямо пропорционально ошибке. Если использовать только пропорциональную составляющую, это всегда будет приводить к ошибке в системе. Если значение пропорциональной составляющей слишком низко, то отклик будет заметно вялый. Если же это значение слишком велико, то система будет непостоянной, а изменения будут иметь колебательный характер.

Интегральная составляющая используется для устранения статической ошибки. Она продолжает увеличивать основную команду задания скорости, основанную на накопленной ошибке за период (или уменьшать скорость в случае отрицательной ошибки).

При моделировании в среде ПК «МВТУ» нечеткой системы ситуационно-

го управления для ПИ-регулятора также применялся алгоритм Мамдани. Правила блока управления на базе нечеткой логики имеют две входные переменные: область изменения ошибки давления  $e$  и область изменения интеграла ошибки давления  $\tilde{e}$ . Данные переменные имеют следующие термы: О – отрицательный, Н – нулевой, П – положительный. К этим обозначениям добавим буквы: М – малый, С – средний, Б – большой. Тогда можно получить следующие термы: ОМ – отрицательный малый, ПБ – положительный большой. Область управляющего воздействия  $u$  будет иметь следующие термы: ОБ, ОС, Н, РС, ПБ.

Для нечеткого вывода формулируются правила следующего вида: ЕСЛИ область изменения ошибки давления = нулевая И область изменения интеграла ошибки давления = положительная, ТО управляющее воздействие нулевое. Все девять правил сведем в таблицу.

**Представление нечетких правил**

$e \setminus \tilde{e}$	П	Н	О
О	Н	ОС	ОБ
Н	ПС	Н	ОС
П	ПБ	ПС	Н

Функции принадлежности лингвистических переменных отображаются треугольными и Z-образными графическими видами. При моделировании проводим сравнительный анализ нечеткого и ПИ-регулирования (рис. 4).

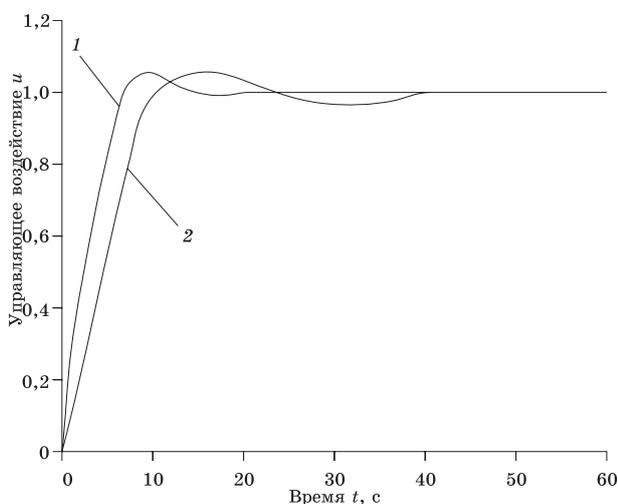


Рис. 4. Переходные процессы по каналу задание. 1 – нечеткое регулирование; 2 – ПИ-регулирование

Анализ рисунка 4 показал, что время регулирования нечеткой системы на 20 с меньше, чем у ПИ-регулятора.

**Выводы**

При нечетком регулировании отсутствует второе отклонение, что свидетельствует о преимуществе системы. Таким образом, в условиях динамики расхода воды нечеткое регулирование предпочтительней по сравнению с типовыми системами регулирования.

Зная управляющее воздействие, можно моделировать нечеткую систему ситуационного управления для преобразователя аналогично с нечеткой системой ситуационного управления для смесителя.

В течение суток расход воды меняется несколько раз. Ночью он минимальный, а утром и вечером достигает максимальных значений. За счет плавного регулирования скорости двигателя насоса преобразователь частоты в любых условиях, даже при резком изменении расхода, поддерживает постоянный напор в системе. При таком регулировании экономится не только вода, но и электроэнергия, тепло, повышается ресурс оборудования.

Использование методов нечеткого управления позволяет получить качественные процессы регулирования исполнительных устройств без использования громоздких вычислительных процедур.

1. Болотова Л. С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. – М.: Финансы и статистика, 2012. – 663 с.

2. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. – СПб: Питер, 2001. – 710 с.

3. Круглов В. В., Дли М. И., Голубов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.

4. Тимофеев К. А. Описание языка программирования ПК МВТУ. – М.: МВТУ, 2004. – 120 с.

5. Козлов О. С. Теория автоматического управления в примерах и среда моделирования ПК МВТУ. – М.: МВТУ, 2004. – 248 с.

Материал поступил в редакцию 26.11.12.  
**Сорокин Алексей Борисович, аспирант**  
 Тел. 8 (499) 481-15-73,8 (903) 710-17-11  
 E-mail: ab\_sorokin@mail.ru