

УДК 621.34.07: 021.65:620.9

УПРАВЛЕНИЕ АГРЕГАТАМИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

Кузнецов В.Н.¹, Есилевский В.С.², Дядюн С.В.^{3,4}

(¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал Национального исследовательского технологического университета "МИСиС"),

г. Старый Оскол, Российская Федерация;

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина;

³ Харьковский национальный университет городского хозяйства
им. А.Н. Бекетова, г. Харьков, Украина;

⁴ Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина)

Рассматривается система управления насосной станцией с использованием регулятора на основе нейронной сети с нечеткой логикой. Произведено моделирование работы классического и нечеткого регулятора. Показана возможность реализации регулятора в виде адаптивной многослойной нейронной сети.

Постановка проблемы

При перекачивании сточных вод большое значение имеет правильное определение вместимости резервуаров и насосных агрегатов. Использовать слишком большие резервуары, а также допускать длительный застой воды в резервуаре неприемлемо. В случае маленькой вместимости резервуара значительно усложняется эксплуатация насосной станции из-за того, что приходится производить большое число включения насосных агрегатов. Чем больше мощность электродвигателя насосного агрегата, тем меньше его включений допускается в течение определенного времени [1].

Автоматика большинства канализационных насосных станций работает по следующему принципу. При достижении определенного уровня в накопительном резервуаре включают один насосный агрегат; если уровень воды в резервуаре продолжает возрастать и достигает другой отметки, то в работу включается ещё один насосный агрегат и так далее. Через определенное время, когда вода из резервуара откачивается полностью, насосные агрегаты выключаются. Такая система приводит к нерациональному использованию электроэнергии, и в определённых ситуациях, к чрезмерно частому включению либо слишком длительной работе насосных агрегатов, а также застою воды в резервуаре.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим модель канализационной насосной станции с приёмным резервуаром и максимально допустимым в нём уровнем воды $h_{\max}$, а также:

- множество напорных трубопроводов J ;
- множество идентичных по характеристикам доступных для включения насосных агрегатов $I_{j\max}$ на j -м напорном трубопроводе, $j \in J$;

- объем приходящей воды в накопительный резервуар $Q_{пр}(t)$, $t \in G$.

Необходимо составить такой график запуска насосных агрегатов $I_j(t)$, причем $I_j(t) \in I_{\max}$, $j \in J$, $t \in T$, чтобы минимизировать суммарный расход электроэнергии по всем насосным агрегатам:

$$N_{\text{общ}} = \sum_t \sum_j \sum_i^{I_j(t)} N_{ij}(Q_j)$$

при ограничениях:

- время застоя воды в резервуаре не превышало предельно допустимую норму: $t_{\text{зат}} < t_{\text{заст max}}$;

- количество включений насосных агрегатов за некий промежуток времени не превышало предельно допустимое.

Методы решения

В основе предлагаемого решения лежит теория нечетких множеств и отображений. В данной работе алгоритм нечеткого управления реализован для насосной канализационной станции со средней суточной производительностью 22000 м³, приёмным резервуаром 4 м * 1 м * 10 м, объемом 40 м³. От станции проложены два напорных трубопровода. На станции установлено 4 насосных агрегата, по два на каждый напорный трубопровод. Насосные агрегаты Ф-типа, подачей 540 м³/ч и напором 94 м.

Входными параметрами системы являются следующие лингвистические (в терминах теории нечетких множеств) переменные:

а) «динамика уровня воды» определяет объем воды, который регулярно получает или отдает резервуар (значения: «сильно понижается», «понижается», «не меняется», «повышается», «сильно повышается»);

б) «ожидаемый приток воды по прогнозу» определяет объем приходящей в накопительный резервуар воды («низкий», «средний», «большой»);

в) «текущий приток воды» - объем приходящей в накопительный резервуар воды в текущий момент времени («низкий», «средний», «большой»);

г) «текущий приток воды по прогнозу» определяет объем воды, который должен был потупить в текущий момент времени по прогнозу («низкий», «средний», «большой»);

д) «уровень воды» определяет текущий уровень воды в накопительном резервуаре насосной станции («очень низкий», «низкий», «высокий», «очень высокий»);

е) «включенные насосы» в нашем случае принимает одно из 4-х значений, соответствующее различным комбинациям включения 4 насосов.

Две последние лингвистические переменные являются также и выходными параметрами системы. Промежуточными параметрами системы являются:

а) «динамика притока воды» определяет степень изменения объ-

ема приходящей в накопительный резервуар воды.

б) «динамика уровня воды с учетом прогноза» как и «динамика уровня» определяет объем воды, который получает или отдает резервуар, но учитывает тенденцию притока воды исходя из прогноза и его достоверности.

Выходным параметром системы является «включенные насосы».

Графики функций принадлежности для переменных представлены на рис. 1.

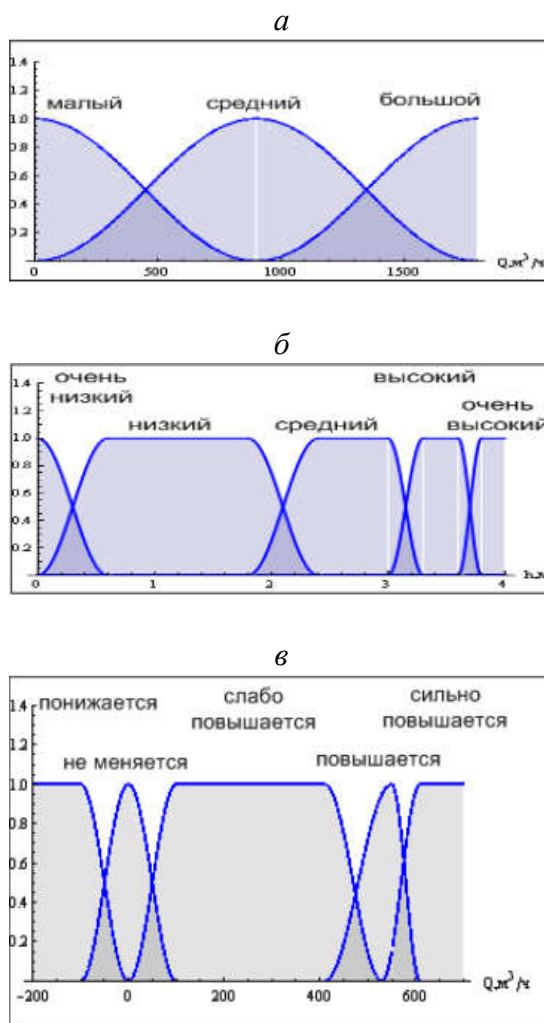


Рис. 1. Графики функций принадлежности для переменных.

а) «текущий приток воды», «текущий приток воды по прогнозу», «ожидаемый приток воды по прогнозу»; б) «уровень воды»; в) «динамика уровня воды».

Условно работу проектируемого нечеткого регулятора можно разбить на несколько этапов:

1. Входные значения «текущий приток воды», «текущий приток воды по прогнозу» и «ожидаемый приток воды по прогнозу» фаззифицируются, после чего с учетом базы правил «динамика притока» агрегируются, активизируются и аккумулируются. Полученные значения истинности для каждого термина из терм-множества «динамика притока воды» не дефаззифицируются, а направляются на следующий этап, как уже фаззифициро-

ванная входная переменная.

2. Входное значение «динамика уровня воды с учетом прогноза» и уже фаззифицированных значений переменной «динамика притока воды» агрегируются и аккумулируются (активация в данном случае не нужна). Полученные значения истинности для каждого терма из терм-множества «динамика уровня воды с учетом прогноза» не дефаззируются, а направляются на следующий этап, как уже фаззифицированная входная переменная.

3. Входное значение «уровень воды» фаззифицируется и с учетом базы правил «включенные насосы», которая также зависит от переменной «включенные насосы», и уже фаззифицированных значений переменной «динамика уровня воды с учетом прогноза» агрегируются, аккумулируются (активизация в данном случае не нужна) и дефаззируются по методу правого модального значения. Полученное значение для «включенные насосы» отправляется на выход системы, а также на вход системы, как параметр, влияющий на базу правил «включенные насосы».

База правил содержит большое количество правил, полученных в результате работы с экспертом. В рассматриваемой модели использовалось следующее количество правил: для переменной «Динамика притока воды» – 27, переменной «Включенные насосы» – по 25 для каждого из 4 значений, для переменной «Динамика притока воды» – 27, для переменной «Динамика уровня воды с учетом прогноза» – 25.

При моделировании рассматривалась насосная канализационная станция со средней суточной производительностью 22000 м^3 , приёмным резервуаром $4 \text{ м} \times 1 \text{ м} \times 10 \text{ м}$, объёмом 40 м^3 . От станции проложены два напорных трубопровода. На станции установлено 4 насосных агрегата, по два на каждый напорный трубопровод. Графическое представление модели насосной станции представлено на рис. 2, где 1 – насосные агрегаты, 2 – приёмный резервуар, 3 – напорные трубопроводы.

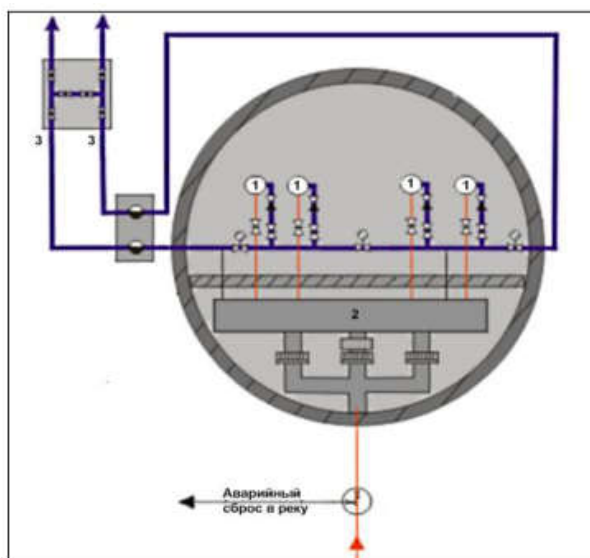


Рис. 2. Графическое представление канализационной насосной станции.

Модель канализационной насосной станции была построена на основе реальной канализационной насосной станции (КНС № 15а – «Юж-кабель», г. Харьков, Украина), с той лишь разницей, что не были учтены реальные насосные агрегаты. На станции установлены насосные агрегаты Ф-типа, подачей $540 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором в 94 м.

Моделирование работы системы производится на отрезке времени длиной 24 часа (сутки). Был составлен прогноз притока сточных вод в приёмный резервуар рассматриваемой канализационной станции в зависимости от времени суток, график которого представлен на рис. 3.

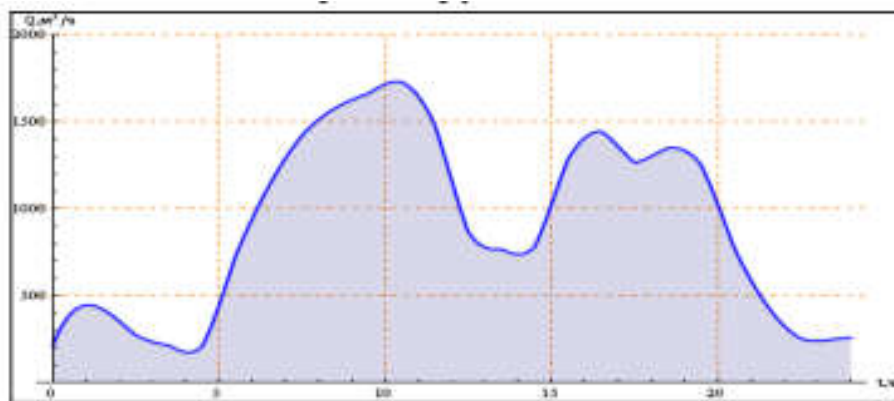


Рис. 3. График реального притока сточных вод в приёмный резервуар в зависимости от времени суток.

Для сравнения была выбрана классическая система управления на насосных станциях, в которой включение насосных агрегатов происходило на уровнях 3 м, 3,3 м, 3,6 м, 3,7 м накопительного резервуара.

В результате моделирования были получены графики изменения уровня воды в зависимости от времени суток для классической системы управления (рис. 4, а) и нечеткого регулятора (рис. 4, б), а также графики количества запущенных насосов для классической системы управления (рис. 5, а) и нечеткого регулятора (рис. 5, б). Как видно из графиков классической системы, в часы изменения притока воды могут складываться ситуации, когда время застоя воды в резервуаре и время непрерывной работы насосных агрегатов слишком велико, либо же наоборот – частота запусков насосных агрегатов в определенных ситуациях становится слишком большой, что отрицательно сказывается на энергооборудовании.

Как видно из приведенных данных и сравнительных данных в таблице 1, разработанный алгоритм нечеткого регулятора обладает рядом преимуществ перед классической схемой управления, используемой на канализационных насосных станциях. И хотя разница в затратах электроэнергии и невелика, тем не менее, удалось добиться улучшений по большинству других рассматриваемых критериев, что положительно отразится на состоянии оборудования насосной станции, а как следствие – понизятся расходы на его обслуживание и ремонт.

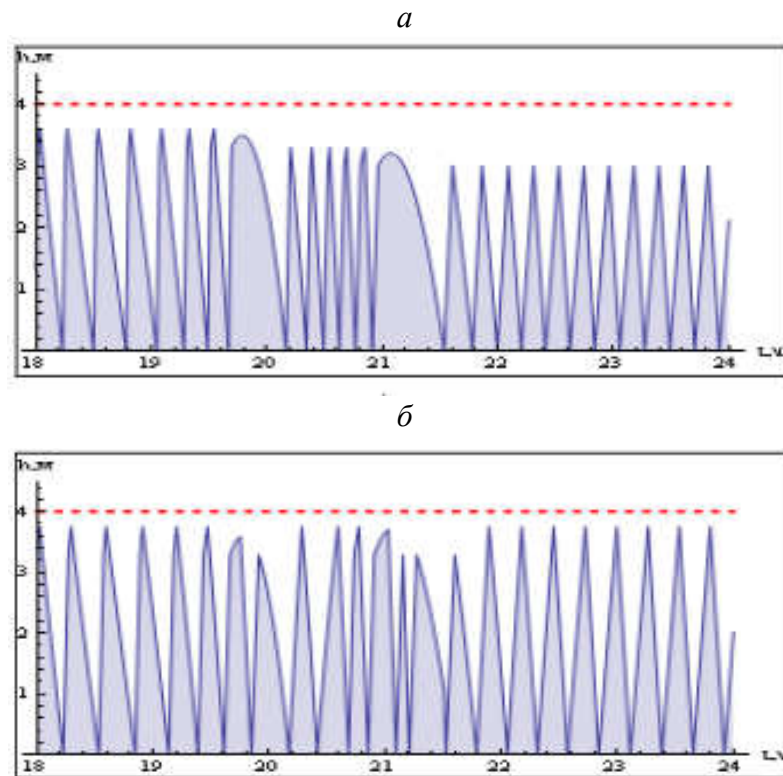


Рис. 4. График изменения уровня воды на промежутке времени с 18.00 до 0.00 при
 а) классической системе управления, б) нечетком регуляторе.

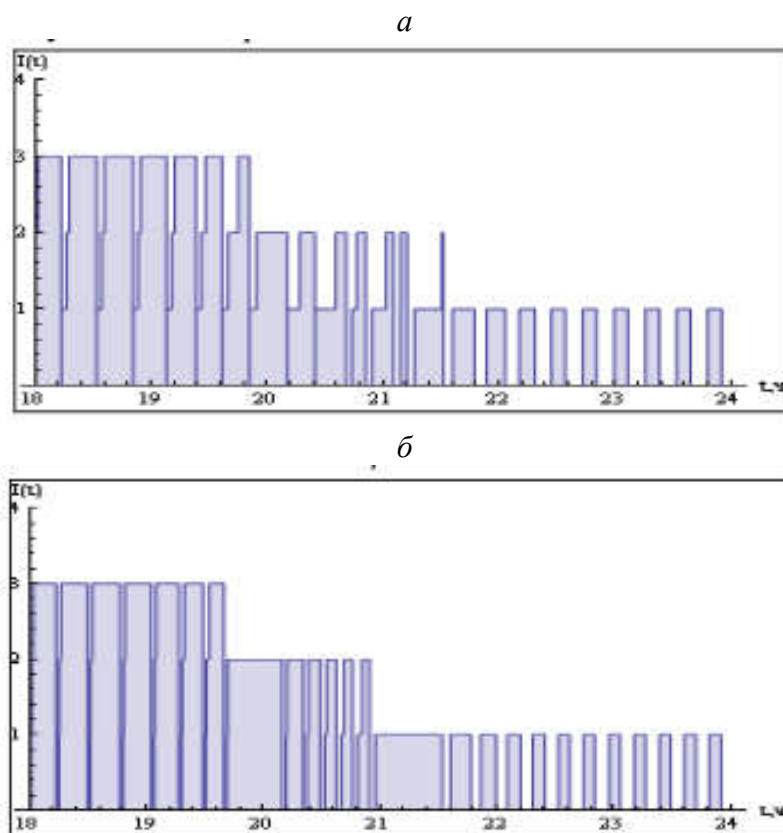


Рис. 5. График количества включённых насосов на промежутке времени с 18.00 до 0.00
 при а) классической системе управления, б) нечетком регуляторе.

Построение нейросетевой реализации нечеткого регулирования

Как указывалось во введении, недостатком системы нечеткого регулирования является невозможность автоматической адаптации и обучения. Для решения этой проблемы воспользуемся подходом на основе нейронных сетей. Представим систему нечеткого управления в форме многослойной сети с прямым распространением сигнала. Для их обучения принято использовать алгоритм обратного распространения ошибки. Это позволит реализовать модуль нечеткого управления в виде многослойной нейронной сети, которая будет обладать адаптивностью.

Т а б л и ц а 1

Сравнение классической системы управления и нечеткого регулятора

Максимальное время застоя воды в резервуаре, мин	84	25
Сравнительный критерий	Классическая система управления	Нечеткий регулятор
Суммарно затраченная электроэнергия, кВт	10444,5	10389,5
Среднее время застоя воды в резервуаре, мин	15	16
Общее количество запусков насосных агрегатов	203	215
Суммарное время работы всех насосных агрегатов	23ч 55мин	22ч 40мин
Максимальное время работы одного насосного агрегата без остановки, мин	84	25

Систему управления на основе нечетких множеств можно привести к виду, удобному для нейросетевого моделирования [2]. Для этого нужно представить нечеткое множество функций в виде куполообразной функции Гаусса. При этом её два параметра (центр и ширину) можно будет настраивать в процессе обучения. Операцию нечеткой импликации можно представить в виде произведения, что также легко может быть смоделировано как распространение сигнала в сети.

Такой вид системы представляет собой один из часто применяемых способов реализации нечетких систем. Каждый элемент такой системы можно задать в форме функционального блока (сумма, произведение, функция Гаусса), что позволяет создать многослойную сеть, представленную на рис. 6. Слои обозначены символами от $L1$ до $L4$.

В представленной сети выделены четыре слоя.

Слой 1 ($L1$). Каждый его элемент реализует функцию принадлежности нечеткого множества. В этот слой поступают входные сигналы, а на его выходе формируются значения функции принадлежности для этих сигналов. Функциональная зависимость между входом и выходом в узлах этого слоя определяется функцией Гаусса. Его параметры будут модифицироваться в процессе обучения, что позволит улучшать подбор нечетких множеств.

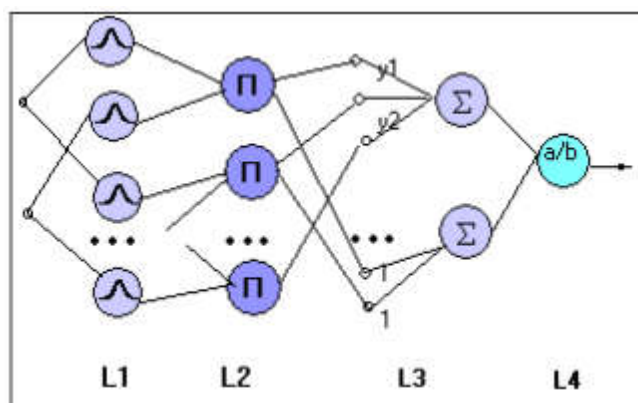


Рис. 6. Схема нейросетевой реализации модуля нечёткого управления.

Количество элементов слоя $L1$ определяется количеством входных элементов и правил и равно произведению количества входных переменных и нечетких правил.

Слой 2 ($L2$). Конфигурация связей этого слоя соответствует базе правил, а мультипликаторы – блоку вывода. На выходе слоя $L2$ формируется результат вывода в виде значения функции принадлежности. Количество элементов этого слоя равно количеству правил N . Применение мультипликаторов в качестве узлов слоя $L2$ обусловлено тем фактом, что для нечеткой импликации используется операция умножения.

Слои 3 ($L3$) и 4 ($E4$). Оба слоя представляют собой реализацию блока дефаззификации. Веса связей, доходящих до верхнего слоя $L3$ и обозначенные y_i , интерпретируются как центры функций принадлежности нечетких множеств. Эти веса будут модифицироваться в процессе обучения. На выходе системы слоя $L4$ формируется «четкое» (дефаззифицированное) выходное значение модуля управления u . Полученная схема представляет собой многослойную сеть, основанную на нечетком выводе. Поэтому её можно обучать так же, как и обычную нейронную сеть, если использовать обобщенный алгоритм обратного распространения ошибки². Для этого необходима обучающая выборка в виде пар: входной вектор – эталонный выходной сигнал, которая может быть получена при наблюдении за реальной работой насосной станции.

Выводы

Применение теории нечетких множеств в комбинации с теорией нейронных сетей для построения нечетко-нейронного регулятора для управления насосными агрегатами водоотведения показал перспективность такого подхода. Имитационное моделирование и реальная эксплуатация показали, что регулятор на основе нечеткой логики обладает рядом преимуществ перед классическими регуляторами, позволяя учитывать трудно формализуемые ограничения и правила. Использование в конструкции системы нечеткого регулирования нейросетевой модели позволяет добавить

свойство адаптивности и обучаемости.

Нечетко-нейронный регулятор для управления канализационными насосными агрегатами – перспективный по эффективности и безопасности способ управления насосными станциями.

Литература

1. Есилевский В.С., Кузнецов В.Н., Уварова Л.В. Минимизация энергозатрат на управление насосными станциями путем использования регуляторов с нечеткой логикой / Москва.: «Сантехника». Водоснабжение ООО ПИП «АВОК-ПРЕСС». Водоотведение, 2009. – № 1. – С. 64–70.

2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. – М. Горячая линия. – Телеком, 2004. – 452 с.

3. Pulido-Calvo, J.C. Gutiérrez-Estrada. Selection and operation of pumping stations of water distribution systems [Text] // Environmental Research Journal, Nova Science Publishers. – 2011. – Vol. 5, Issue 3. – P. 1–20.