

Б.В. ПРИХОДЧЕНКО, аспирант ДонНТУ,
В.П. ТАРАСЮК, канд. техн. наук, доцент ДонНТУ

ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

В работе приведены результаты нейросетевого моделирования технологического процесса очистки сточных вод для выбора оптимального технологического режима, был рассмотрен математический аппарат данного технологического процесса и различного рода сложности и неопределенности, возникающие при его протекании.

In the work the results of modeling of technological process of sewage treatment by means of a neural network for a choice of an optimum technological mode are resulted, the mathematical apparatus of the given technological process and any complexity and the uncertainty, arising at its course has been considered.

Введение. На сегодняшний день более 80% очистных сооружений в Украине не работают или не обеспечивают необходимое качество очистки из-за ненадежности при длительной эксплуатации аэрационного оборудования, что приводит к ухудшению и полному прекращению процесса биологической очистки в холодное время года, быстрой гибели активного ила при перерывах в подаче электроэнергии и аварийном состоянии.

К указанному числу относятся почти все устаревшие сооружения с биологическими фильтрами.

Ограниченные возможности бюджетного финансирования не позволяют в полном объеме нормализовать работу систем водоотведения. Заказы на проектирование и строительство очистных сооружений выполняются в основном за счет бюджетных средств.

Огромное количество средств уходит на строительство дорогостоящих, неэкономичных и недостаточно эффективных очистных сооружений канализации, в то время как совершенствование существующих сооружений может существенно увеличить качество очистки сточных вод и снизить затраты электроэнергии.

Постановка проблемы. Управление технологическими процессами очистки сточных вод приходится осуществлять в условиях информационной неопределенности связанной со сложностью протекания биохимического процесса очистки сточных вод [1]. При данных обстоятельствах применение традиционных методов управления не является достаточно эффективным. В основу построения информационно-измерительной системы управления процессом очистки сточных вод положен глубинный анализ самого

технологического процесса очистки сточных вод, а точнее его биологического этапа.

В работе [2] отмечено, что для поддержания заданного эксплуатационного режима информационно-измерительная система должна иметь в своем составе достаточно сложный механизм принятия решения, что делается возможным только с использованием стратегического подхода к преодолению локальных неопределенностей в задаче управления технологическим процессом.

Для преодоления неопределенностей, максимально точного прогнозирования параметров и выработки управляющих воздействий в данном технологическом процессе предлагается использовать комбинированный подход, объединяющий в себе результаты работы контрольно-измерительных приборов (кислородомеры, уровнемеры, мутномер), теорию искусственных нейронных сетей и элементы нечеткой логики.

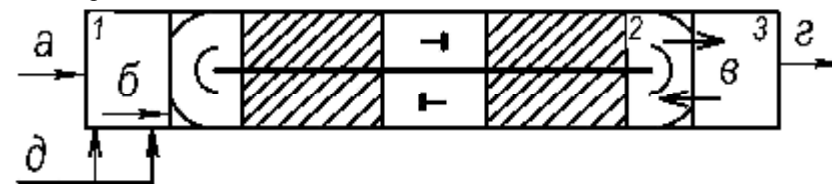
Основная часть.

В основу методики построения интеллектуальной компьютерной информационно-измерительной системы управления технологическим процессом биологической очистки сточных вод входит анализ самого процесса биологической очистки сточных вод.

В классической схеме реализации биологической очистки сточных вод [3] в аэротенках, процесс очистки осуществляется в проточном режиме и включает аэрационные и отстойные сооружения, оборудование и коммуникации для подачи и распределения сточных вод по аэротенкам, сбора и подачи иловой смеси на илоотделение, отведения очищенной воды, обеспечения возврата в аэротенки циркуляционного активного ила и удаления избыточного ила, подачи и распределения воздуха в аэротенках.

Аэротенк представляет собой прямоугольный резервуар, разделенный продольными перегородками на отдельные коридоры, по которым иловая смесь протекает от входа в аэротенк к выходу из него при постоянном перемешивании и обогащении кислородом воздуха.

Схема реализации процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке представлена на Рис.1.



Где: 1 - первичный отстойник; 2 - биореактор; 3 - вторичный отстойник;
а – ступающая сточная вода; б - осветленная сточная вода; в - возвратный ил;

г – очищенная сточная вода; д - реагент (FeCl₃); заштрихованная часть - зона переменной аэрации.

Основными критериями, определяющими выбор технологического режима биологической очистки сточных вод является:

- концентрация растворенного кислорода в аэротенках;
- доза ила в аэротенках;
- иловый индекс;
- гидробиологическое состояние ила.

Основными факторами, влияющими на процесс очистки, являются:

- нагрузка на аэротенк по органическим веществам;
- процент рециркуляции активного ила;
- процент регенерации активного ила.

В качестве контрольно измерительных приборов в данном процессе используются датчики кислородомеры, уровнемеры, мутномеры. Состояние активного ила оценивается в лаборатории по специально отобраным пробам несколько раз в день квалифицированными специалистами. На основании всех указанных выше параметров технологами предприятия делается вывод о правильности протекания технологического процесса и его корректировке.

Концентрацию активного ила, поддерживаемую в эксплуатационном режиме аэрационного сооружения, называют «дозой активного ила» и обозначают a_j . Таким образом, среднюю нагрузку на активный ил по загрязнителям, выраженным через БПК, можно представить как:

$$q_j = \frac{L_{en}}{a_j(1 - S)_{tat}} \quad (1)$$

Где L_{en} - БПК поступающей в аэрационный бассейн сточной жидкости, мг/л или г/м³;

S – зольность ила, доли единицы;

a_j – доза ила, выражаемая в г/л, если БПК выражена в мг/л, и в г/м³, если БПК выражена в г/м³;

t_{at} – длительность пребывания жидкости (т.е. находящихся в ней загрязнений) в аэрационном бассейне, ч.

Удельная скорость окисления загрязнений – это то количество загрязнений, которое может быть снято 1 г беззольного вещества сухого ила в 1 ч в заданных условиях реализации процесса биохимической очистки. Значение этого параметра устанавливается экспериментальным путем. Средняя нагрузка на ил и удельная скорость окисления связаны между собой тем, что для конкретных заданных условий технологической реализации процесса наибольшая скорость окисления загрязнений при обеспечении требуемой глубины их изъятия достигается лишь при определенных нагрузках загрязнений на ил. Это означает, что если нагрузка на ил велика, то активный ил с ней не справится и требуемое качество очистки не будет

обеспечено. Если же нагрузка на ил будет мала, то активный ил будет испытывать недостаток питания и, следовательно, «не дорабатывать», а в определенных границах недогрузки будет иметь место самоокисление активного ила и падение рабочей дозы ила в аэротенке.

Из формулы видно, что и средняя нагрузка на ил и удельная скорость окисления могут поддерживаться на определенном уровне при соблюдении постоянства произведения $a_j t_{at}$, т.е. дозы ила на длительность его воздействия на загрязнения. Однако доза ила в аэрационном сооружении не может назначаться произвольно, и, следовательно, справедливость этого выражения носит весьма ограниченный характер. Как живая биологическая система активный ил требует определенного объема, что становится очевидным, если ил оставить в покое и дать ему возможность осаждения. В зависимости от таких факторов, как характер загрязнений, нагрузка на ил, доза ила, длительность отстаивания, занимаемой илом объем изменяется в довольно широких пределах. Для возможности сравнения значений этого показателя, полученных экспериментально исследуя пробы воды, взятые из аэротенка. Если попытаться установить произвольно высокую концентрацию ила в аэрационном сооружении, то при переходе иловой смеси в сооружение для отделения ила путем его осаждения последний будет постепенно выноситься вместе с очищенной водой и в аэрационном сооружении установится концентрация активного ила, соответствующая иловому индексу для данных условий, в лаборатории, в различных технологических условиях, вводится стандартизированное понятие илового индекса I_i , представляющего собой объем, мл, приходящийся на 1 г сухого вещества активного ила после 30-минутного отстаивания иловой смеси.

Следовательно, дозу ила следует рассматривать как оптимальную концентрацию активного ила в аэрационном сооружении, складывающуюся под воздействием различных факторов, характеризующих тот или иной технологический режим работы аэрационных сооружений, сооружений илоотделения и пр. В этой связи уместно говорить лишь о некоторых средних значениях дозы ила в аэрационных сооружениях, отметив, может колебаться в довольно больших пределах, что является неопределенностью для системы управления технологическим процессом:

- 3 – 5 г/л – при продленной аэрации;
- 3 – 4 г/л – при низких нагрузках на ил;
- 2,5 – 3,5 г/л – при средних;
- 2 – 3 г/л – при высоких нагрузках.

Экспериментально установлено, что в массу прироста ила включается около 25 – 30% снимаемой в сооружении БПК_{полн} и около 75 – 80% поступивших в него взвешенных веществ. Но в связи с тем, что в аэротенке может поддерживаться лишь определенная для данных условий

концентрация ила, прироста масса ила должна быть своевременно удалена из системы биологической очистки.

Поступление кислорода в аэротенки обеспечивают турбовоздуходувные агрегаты с синхронными электродвигателями, а его регулирование осуществляется посредством их включения и отключения.

Расчет системы аэрации предусматривает определение необходимого количества воздуха (кислорода), расчетных параметров его подачи в аэротенки (расход и давление), числа воздухораспределительных устройств – аэраторов для обеспечения заданного кислородного режима и гидродинамических условий в аэротенке.

Для определения необходимого количества воздуха для подачи в аэротенки производится расчет удельного расхода воздуха q_{air} на 1 м³ очищаемой воды, м³/м³ по Формуле 2.

$$q_{air} = \frac{q_o(L_{en} - L_{ex})}{K_1 K_2 K_3 K_t (C_a - C_t)} \quad (2)$$

Где q_o - удельный расход кислорода, мг на 1 мг снятой БПК_{полн}, принимаемый при очистке до БПК_{полн} = 15 – 20 мг/л равным 1,1, а до БПК_{полн} > 20 мг/л – 0,9;

K_1 - коэффициент, учитывающий тип аэратора, т.е. размер пузырьков воздуха, образующихся при выходе из аэратора. Для среднепузырчатой и низконапорной аэрации $K_1 = 0,75$;

K_2 - коэффициент, зависящий от глубины погружения аэратора, h_a : чем глубже погружен аэратор, тем дальше пузырек воздуха будет находиться в воде и тем большее количество кислорода успеет перейти из него в окружающую жидкость за время его подъема к поверхности и выхода из жидкости. Значение коэффициента K_2 возрастает с 0,4 при $h_a = 0,5$ м, до 3,3 при $h_a = 6$ м, что также является неопределенностью из-за различного уровня жидкости в разное время суток;

K_t - коэффициент, учитывающий температуру сточных вод и принимаемый равным 1 при $t_w = 20^\circ\text{C}$. Для температуры воды отличной от 20°C ,

$$K_t = 1 + 0,02(t_w - 20) \quad (3)$$

(здесь t_w – среднемесячная температура воды за летний период, °C);

K_3 - коэффициент качества воды, принимаемый для городских сточных вод 0,85; для других видов сточных вод определяется экспериментальным путем. При наличии в сточных водах СПАВ коэффициент K_3 в значительной степени зависит от отношения суммарной площади аэраторов f_{ar} к площади днища аэротенков f_{at} и изменяется от 0,59 при $f_{ar}/f_{at} = 0,05$ до 0,99 при $f_{ar}/f_{at} = 1$;

C_a - растворимость кислорода воздуха в воде, мг/л, определяемая как

$$C_a = \frac{(1 + h_a) C_t}{20,6} \quad (4)$$

здесь C_t – растворимость кислорода в воде в зависимости от температуры t и атмосферного давления.

C_o - средняя концентрация растворенного кислорода в иловой смеси в аэротенке, мг/л; может приниматься от 0,5 мг/л в головной части аэротенка до 0,5 мг/л в его хвостовой части.

Определив удельный расход воздуха, м³ на 1 м³ очищаемой жидкости, определяют общую потребность воздуха, м³/ч, как

$$Q_{air} = q_{air} q_w \quad (5)$$

По пропускной способности аэратора (например, фильтросная пластина размером 0,3х0,3 м² в плане пропускает 6 м³ воздуха в 1 ч) определяется число пневматических аэраторов, а следовательно, и площадь аэраторов f_{ar} .

$$f_{ar} = 2n a f_{ap} \quad (6)$$

где n – число аэраторов;

f_{ap} - площадь одного аэратора (f_{ap} – площадь фильтросной пластины = 0,09 м²).

В площадь аэраторов включаются и просветы между аэраторами, если они не превышают площади аэратора (именно поэтому в формулу вводится коэффициент 2).

По полученному значению f_{ar} определяется отношение f_{ar}/f_{at} и уточняется значение всех коэффициентов, входящих в формулу определения удельного расхода воздуха (и зависящих от этого отношения), а также уточняется удельный расход воздуха. Если принятая в первом приближении величина f_{ar}/f_{at} совпадает с расчетной, то определяется интенсивность аэрации, под которой понимается количество воздуха, подаваемое на 1 м² площади аэротенка в 1 ч:

$$J_a = q_{air} \frac{H_{at}}{f_{at}} \quad (7)$$

где H_{at} – глубина аэротенка.

Интенсивность аэрации не должна быть ниже определенного предела с тем, чтобы обеспечивать надлежащее перемешивание содержимого аэротенка независимо от потребности ила в кислороде. Минимальная интенсивность лежит в пределах 48 м³/(м²ч) при глубине погружения аэратора $h_a = 0,5$ м и 2,5 м³/(м²ч) при $h_a = 6$ м. С другой стороны, интенсивность аэрации не должна превышать определенных значений, так как из-за повышенного содержания воздуха в жидкости фактическая эффективность аэрации понизится по сравнению с расчетными ее значениями. Максимальные

значения интенсивности зависят от отношения f_{ar}/f_{at} и изменяются от 5 м³/(м²ч) при $f_{ar}/f_{at} = 0,05$ до 100 м³/(м²ч) при $f_{ar}/f_{at} = 1$.

Таким образом, для поддержания заданного эксплуатационного режима автоматизированная система управления должна иметь в своем составе достаточно сложный механизм принятия решения, что делается возможным только с использованием стратегического подхода к преодолению локальных неопределенностей в задаче управления, который всегда классифицировался в качестве основного критерия уровня интеллектуального развития человека. Следовательно, единственным способом достичь высокой степени автоматизации объекта является использования стратегического подхода к управлению объектом.

Искусственные нейронные сети являются наиболее эффективным методом решения там, где традиционные вычисления трудоемки или физически неадекватны. Сегодня могут быть построены искусственные нейронные сети для решения таких задач, которые являются трудными как для компьютеров, построенных по традиционной схеме, так и для человека.

Далее рассмотрим процесс построения искусственной нейронной сети.

Разрабатываемую нейронную сеть можно назвать гибридной, так как формально по структуре она идентична многослойной нейронной сети с обучением, например, по алгоритму обратного распространения ошибки, но скрытые слои в ней соответствуют этапам функционирования нечеткой системы [4].

Для моделирования была использована многослойная нейронная сеть прямого распространения, содержащая 3 слоя. Были проведены эксперименты с нейронными сетями, в которых использовались различные активационные функции: линейная и тангенс гиперболический ($f(s) = \frac{2}{1 + e^{-2s}} - 1$). Для обучения нейросети был использован популярный алгоритм обратного распространения ошибки, программно реализованный в среде Matlab [5]. В качестве целевого вектора был задан параметр, влияющий на подачу управляющих сигналов в ходе технологического процесса.

Итак имеем нейронную сеть, содержащую следующими слоями:

- 1-й слой нейронов выполняет функцию введения нечеткости на основе заданных функций принадлежности входов;
- 2-й слой отображает совокупность нечетких правил;
- 3-й слой выполняет функцию приведения к четкости.

Каждый из описанных выше слоев характеризуется набором параметров параметрами функций принадлежности, нечетких решающих правил, активационных функций, весами связей), настройка которых производится, так же, как для обычных нейронных сетей [6].

Входы, выходы и веса гибридной нейронной сети - есть вещественные числа, принадлежащие отрезку [0,1]. Примером подобной сети служит система, имеющая следующую базу знаний:

П1: если X_1 есть L_1 и X_2 есть L_2 и X_3 есть L_3 , то z есть H ,

П2: если X_1 есть H_1 и X_2 есть H_2 и X_3 есть L_3 , то z есть M ,

П3: если X_1 есть H_1 и X_2 есть H_2 и X_3 есть H_3 , то z есть S ,

где X_1, X_2, X_3 - входные переменные,

z - выход системы,

$L_1, L_2, L_3, H_1, H_2, H_3, H, M, S$ - некоторые нечеткие множества с функциями принадлежности сигмоидального типа.

Гибридная нейронная сеть для управления технологическим процессом биологической очистки сточных вод разработана на базе ANFIS-редактора пакета нечеткой логики FUZZY системы Matlab, с помощью которого осуществляется создание или загрузка структуры гибридной системы, просмотр структуры, настройка ее параметров, проверки качества функционирования такой системы.

Создание структуры, настройка параметров и проверка осуществляются по выборкам (наборам данных) - обучающей (Training data), проверочной (Checking data) и тестирующей (Testing data), которые должны быть представлены в виде файлов с расширением *.dat, первые столбцы соответствуют входным переменным, а последний - единственной выходной переменной; количество строк в таких файлах должны соответствовать количеству образцов, на которых проводится обучение.

В правом верхнем углу окна ANFIS -редактора выдана информация (ANFISInfo) о проектируемой системе: количество входов, выходов, функция принадлежности входов.

Опции Test FIS позволяют провести проверку и тестирование созданной и обученной системы с выводом результатов в виде графиков.

Графический интерфейс гибридных нейронных систем содержит следующие окна:

- Fuzzy Inference System Editor (FIS Editor) – редактор нечеткой системы;
- Membership Function Editor – редактор функций принадлежности;
- Rule Editor – редактор правил;
- Rule Viewer – просмотрщик правил и результатов определения выходных данных (управляющего сигнала);
- Surface Viewer – просмотрщик поверхности отклика.

Редактор нечеткой системы (FIS Editor) содержит опции, позволяющие выбирать методы вычисления логических операций и обеспечивать доступ к окнам редактора функций принадлежности.

Кроме функций принадлежности для гибридных нейронных систем требуется формулирование и ввод в нее так называемых правил типа "если

«условие», то «закключение»", называемых импликациями. Правила определяют взаимосвязь между входами и выходами системы, заставляя ее генерировать четкий вывод, учитывая нечеткие суждения. Формулирование правил осуществляется экспертами (технологами). От компетентности экспертов зависит корректность работы системы управления. Сформулированные правила обобщают и вводят в систему при помощи кнопок редактора правил Rule Editor.

Далее приведем несколько правил сформулированные для нашей информационно-измерительной системы:

1. Если уровень жидкости мал и количество кислорода велико, то количество кислорода ила ниже среднего;
2. Если уровень жидкости средний, то количество кислорода среднее и количество ила среднее;
3. Если данные из лаборатории ближе к 0, то количество ила ниже среднего;
4. Если уровень жидкости мал, данные из лаборатории ближе к 1, количество кислорода велико, то количество кислорода следует уменьшить и количество ила следует уменьшить.

Обучающая выборка для нейронной сети представлена в таблице 1

Таблица 1

Обучающая выборка для нейронной сети

Показания кислородомера, %	Показания уровнемера, м	Данные гидробиологического анализа после обработки нейронной сетью	Выходные данные
90	0,3	1	0
70	0,5	0	0,85
50	0,7	0,9	0,9
20	1	0,7	1

На рис.2 показано окно редактора с построенным с помощью нейронной сети графиком зависимости входных и выходных переменных

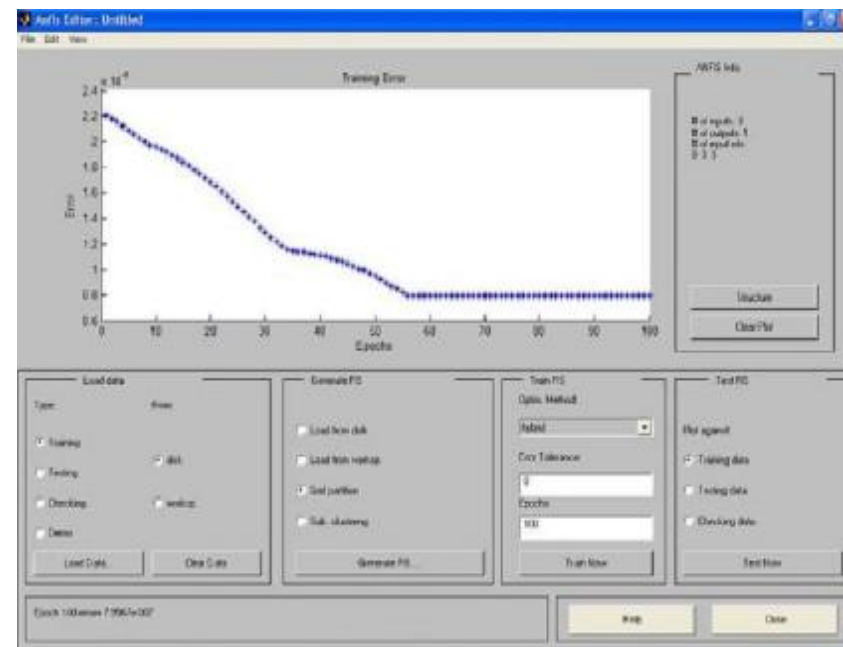


Рис. 2. Окно редактора ANFIS с построенным с помощью нейронной сети графиком зависимости входных и выходных переменных

Далее на рис.3 изображено окно редактора правил с фрагментом списка правил формирования выходных данных

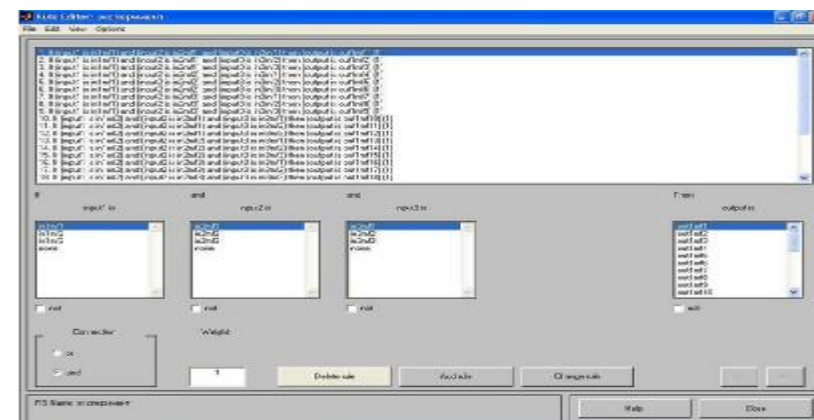


Рис. 3. Окно редактора Rule Editor с фрагментом списка правил формирования выходных данных (в данном случае управляющих сигналов)

На рис.4 изображена структура смоделированной нейронной сети

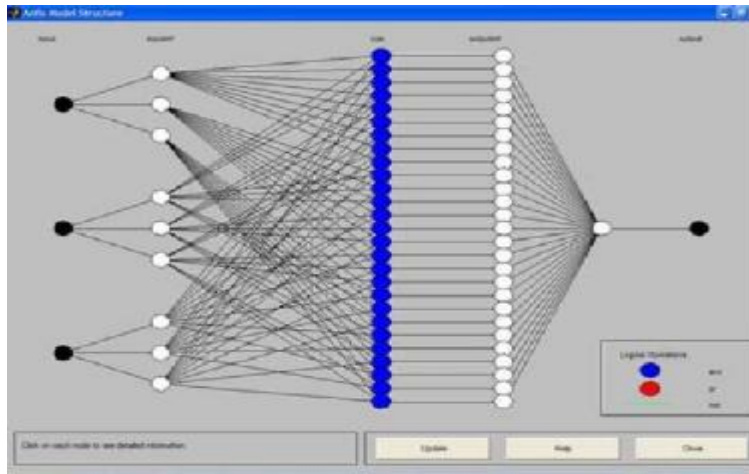


Рис. 4. Смоделированная нейронная сеть

В завершении на рис.5 изображены результаты работы нейронной сети

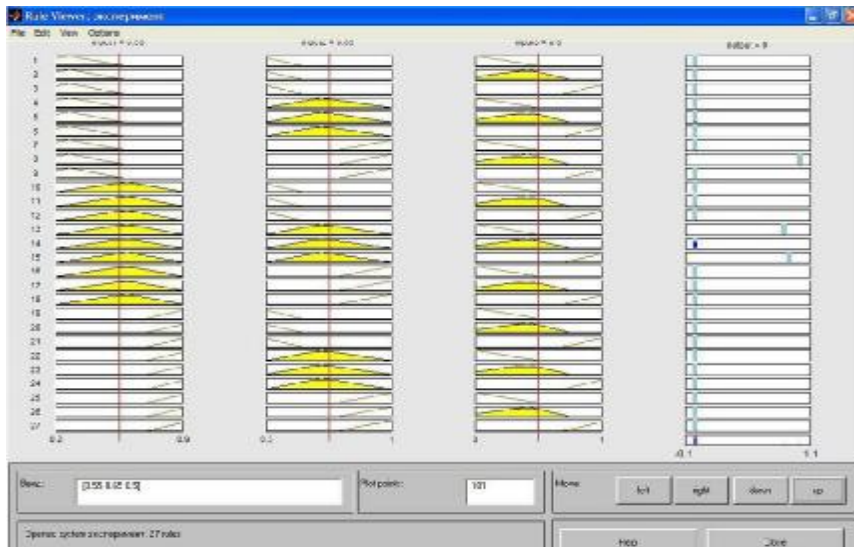


Рис. 5. Результаты работы нейронной сети

Выводы. Рассмотренная выше нейронная сеть с использованием элементов нечеткой логики, как система управления технологическим процессом биологической очистки сточных вод способна формировать управляющие сигналы для исполнительных механизмов. Корректность её работы будет зависеть от компетентности специалистов, привлекаемых для формирования функций принадлежности и формулирования правил работы системы.

Используя такой подход, можно существенно повысить степень автоматизации процесса, обеспечить качественное, максимально обоснованное и своевременное формирование управляющих сигналов. Создание информационно-измерительной системы позволит также снизить нагрузку и затраты на обслуживающий персонал, оптимизировать затраты на электроэнергию и продлить срок жизни активного ила.

Список литературы: 1. Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Нгуен Суан Нгуен. Анализ и синтез систем водообеспечения химических производств – М.: Химия, 2002. – 496 с. 2. В.В.Солдатов Управление проектами автоматизации предприятий / В.В. Солдатов, Д.А. Левиков, Д. С. Пащенко. Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика. – М.: Научтехлитиздат, 2008, N №4.-С.1-3. 3. С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калитун. Водоотведение и очистка сточных вод – М.: Стройиздат 1996, с.588-594. 4. А.Н. Авернин, И.З. Батыршин. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта - М.: Мир, 1986. – 212 с. 5. В. С. Медведев, В.Г. Потемкин. Нейронные сети Matlab 6 – М.: Диалог МИФИ 2002.– 490 с. 6. Саймон Хайкин. Нейронные сети полный курс – Вильямс 2008 – 1104 с