

Б.В. ПРИХОДЧЕНКО, асп., ДонНТУ,
В.П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц., ДонНТУ

ОСНОВНІ МАТЕМАТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

У роботі наведено результати нейромережевого моделювання технологічного процесу очищення стічних вод для вибору оптимального технологічного режиму, був розглянутий математичний апарат даного технологічного процесу і різного роду складності і невизначеності, що виникають при його протіканні.

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.

Вступ. На сьогоднішній день більше 80% очисних споруд в Україні не працюють або не забезпечують необхідну якість очищення із-за ненадійності при тривалій експлуатації аераційного устаткування, що приводить до погіршення і повного припинення процесу біологічного очищення в холодну пору року, швидкої загибелі активного мула при перервах у подачі електроенергії і аварійному стані. До вказаного числа відносяться майже всі застарілі споруди з біологічними фільтрами.

Обмежені можливості бюджетного фінансування не дозволяють в повному обсязі нормалізувати роботу систем водовідведення. Замовлення на проектування і будівництво очисних споруд виконуються в основному за рахунок бюджетних коштів.

Величезна кількість коштів витрачається на будівництво дорогих, неекономічних і недостатньо ефективних очисних споруд, тоді як вдосконалення вже існуючих споруд може істотно покращити якість очищення стічних вод і зменшити витрати електроенергії.

Загальна постановка проблеми. Управління технологічними процесами очищення стічних вод доводиться здійснювати в умовах інформаційної невизначеності, пов'язаною із складністю протікання біохімічного процесу очищення стічних вод [1]. За даних обставин вживання традиційних методів управління не є досить ефективним. У основу побудови інформаційно-вимірювальної системи управління процесом очищення стічних вод покладений глибинний аналіз найтехнологічнішого процесу очищення стічних вод, а точніше його біологічного етапу.

Аналіз робіт [2-3] показує, що для підтримки заданого експлуатаційного режиму інформаційно-вимірювальна система повинна мати в своєму складі досить складний механізм прийняття рішень, що робиться можливим лише з

використанням стратегічного підходу до подолання локальних невизначеностей та обмежень в завданні управління технологічним процесом.

Для подолання цих обмежень, максимально точного прогнозування параметрів і виробки управляючих сигналів в даному технологічному процесі пропонується використовувати комбінований підхід, об'єднуючий у собі результати роботи контрольно-вимірювальних приладів (кислородомери, рівнеміри, мутноміри), теорію штучних нейронних мереж і елементи нечіткої логіки.

Основна частина. У основу інтелектуальної комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи управління технологічним процесом біологічного очищення стічних вод покладено детальний аналіз самого процесу біологічного очищення стічних вод та його математичного апарату.

У класичній схемі реалізації біологічного очищення стічних вод [4] в аеротенках, процес очищення здійснюється в проточному режимі і включає аераційні і відстійні споруди, устаткування і комунікації для подачі і розподілу стічних вод по аеротенках, збору і подачі суміші мула для його подальшого відділення, відведення очищеної води, забезпечення повернення в аеротенки циркуляційного активного мула і видалення надлишкового мула, подачі і розподілу повітря в аеротенках.

Аеротенком є прямокутний резервуар, розділений подовжніми перегородками на окремі коридори, по яких суміш мула протікає від входу в аеротенк до виходу з нього при постійному перемішуванні і збагаченні киснем. Схема реалізації процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку наведена на рис. 1.

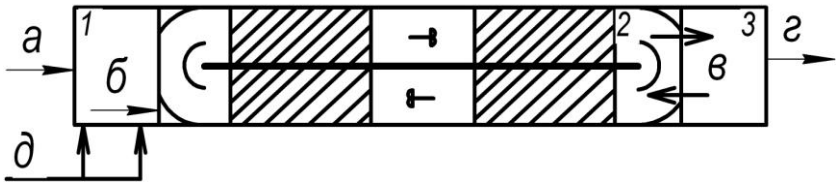


Рис.1. Схема реалізації процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку: 1 - первинний відстійник; 2 - біореактор; 3 - другорядний відстійник; а – стічна вода, що надходить; б - освітлена стічна вода; в – мул, що повертається; г – очищена стічна вода; д - реагент ($FeCl_3$); заштрихована частина - зона змінної аерації.

Основними критеріями, що визначають вибір технологічного режиму біологічного очищення стічних вод є:

- концентрація розчиненого кисню в аеротенках;
- доза мула в аеротенках;
- індекс мула;
- гідробіологічний стан мула.

Основними чинниками, що впливають на процес очищення є:

- навантаження на аеротенк по органічних речовинах;
- відсоток рециркуляції активного мула;
- відсоток регенерації активного мула.

У якості контрольно-вимірювальних приладів в даному процесі використовуються датчики кислородомери, рівнеміри і мутноміри. Стан активного мула оцінюється в лабораторії за спеціально відібраними пробами кілька разів в день кваліфікованими фахівцями. На підставі всіх вказаних вище параметрів технологіями підприємства робиться висновок про хід протікання технологічного процесу і його коректування.

Концентрацію активного мула, що підтримується в експлуатаційному режимі аераційної споруди, називають «дозою активного мула» і позначають a_j . Таким чином, середнє навантаження на активний мул по забрудненнях, виражених через БПК, можна представити як:

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

де Len – БПК стічної рідини, що поступає в аераційний басейн, мг/л або г/м³;

S – зольність мула, долі одиниці;

a_j – доза мула, що виражається в г/л, або в г/м³;

tat – тривалість перебування рідини (тобто забруднень, що знаходяться в ній) в аераційному басейні, год.

Питома швидкість окислення забруднень – це та кількість забруднень, яка може бути знята 1 г беззольної речовини сухого мула в 1 годину в заданих умовах реалізації процесу біохімічного очищення. Значення цього параметра встановлюється експериментальним шляхом. Середнє навантаження на мул і питома швидкість окислення зв'язані між собою тим, що для конкретних заданих умов технологічної реалізації процесу найбільша швидкість окислення забруднень при забезпеченні необхідної якості їх очищення досягається лише при певних навантаженнях забруднень на мул. Це означає, що якщо навантаження на мул велике, то активний мул може з ним не впоратися і необхідна якість очищення не буде забезпечена. Якщо ж навантаження на мул буде мале, то активний мул відчуватиме нестачу харчування і, отже, буде «не допрацьовувати», а в певних межах недовантаження може привести до самоокислювання активного мула і падіння робочої дози мула в аеротенку.

З формули (1) видно, що і середнє навантаження на мул і питома швидкість окислення можуть підтримуватися на певному рівні при дотриманні постійного значення $a_j t_{at}$, тобто дози мула на тривалість його дії на забруднення. Дозу мула слід розглядати як оптимальну концентрацію активного мула в аераційній споруді, що складається під впливом різних чинників, що характеризують той або інший технологічний режим роботи аераційних споруд, споруд для відділення мулу та ін. В зв'язку з цим доречно

говорити лише про деякі середні значення дози мула в аераційних спорудах, відзначивши, що вони можуть вагатися у досить великих межах, що є невизначеністю для системи управління технологічним процесом:

- 3 – 5 г/л – при продовженій аерації;
- 3 – 4 г/л – при низьких навантаженнях на мул;
- 2,5 – 3,5 г/л – при середніх навантаженнях на мул;
- 2 – 3 г/л – при високих навантаженнях на мул.

Експериментально встановлено, що в масу приросту мула включається біля (25 – 30)% БПК_{полн}, що знімається в спорудженні і біля (75 – 80)% зважених речовин, що поступили в нього. Але у зв'язку з тим, що в аеротенку може підтримуватися лише визначена для даних умов концентрація мула, маса мула, що приросла, має бути своєчасно видалена з системи біологічного очищення.

Надходження кисню в аеротенки забезпечують повітрорудні агрегати з синхронними електродвигунами, а його регулювання здійснюється завдяки їх включенню і відключенню.

Розрахунок системи аерації передбачає визначення необхідної кількості повітря (кисню), розрахункових параметрів його подачі в аеротенки (витрата і тиск), числа повітророзподільних пристроїв – аераторів для забезпечення заданого кисневого режиму і гідродинамічних умов в аеротенку.

Для визначення необхідної кількості повітря для подачі в аеротенки виробляється розрахунок питомої витрати повітря q_{air} на 1 м³ води, що очищається, м³/м³ по формулі

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

де q_o - питома витрата кисню, мг на 1 мг знятої БПК_{полн}, що приймається при очищенні до БПК_{полн} = 15 – 20 мг/л рівним 1,1, а до БПК_{полн} > 20 мг/л – 0,9;

K_1 - коефіцієнт, що враховує тип аератора, тобто розмір бульбашок повітря, що утворюються при виході з аератора. Для середньопузирчатої і низьконапірної аерації $K_1 = 0,75$;

K_2 - коефіцієнт, залежний від глибини занурення аератора, h_a : чим глибше занурений аератор, тим довше бульбашка повітря знаходитиметься у воді і тим більша кількість кисню встигне перейти з нього в навколишню рідину за час його підйому до поверхні і виходу з рідини. Значення коефіцієнта K_2 зростає з 0,4 при $h_a = 0,5$ м, до 3,3 при $h_a = 6$ м, що також є невизначеністю завдяки різному рівню рідини в різний час доби;

K_t - коефіцієнт, що враховує температуру стічних вод і що приймається рівним 1 при $t_w = 20^\circ\text{C}$. Для температури води відмінної від 20°C він дорівнює:

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

(тут t_w – середньомісячна температура води за літній період, $^\circ\text{C}$);

K_3 - коефіцієнт якості води, що приймається для міських стічних вод 0,85; для інших видів стічних вод визначається експериментальним шляхом. За наявності в стічних водах СПАВ коефіцієнт K_3 в значній мірі залежить від відношення сумарної площі аераторів f_{ar} до площі днища аеротенків f_{at} і змінюється від 0,59 при $f_{ar} / f_{at} = 0,05$ до 0,99 при $f_{ar} / f_{at} = 1$;

C_a - розчинність кисню у воді, мг/л, що визначається як

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

тут C_t – розчинність кисню у воді залежно від температури t і атмосферного тиску.

C_o - середня концентрація розчиненого кисню в суміші мула в аеротенку, мг/л; може прийматися від 0,5 мг/л у головній частині аеротенка до 0,5 мг/л в його хвостовій частині.

Визначивши питому витрату повітря, m^3 на $1 m^3$ рідини, що очищається, визначають загальну потребу повітря, $m^3 / ч$, як

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

По пропускній спроможності аератора (наприклад, пластина розміром $0,3 \times 0,3 m^2$ здатна пропустити $6 m^3$ повітря в 1 год.) визначається кількість пневматичних аераторів, а отже, і площа аераторів f_{ar} .

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

де n_a – кількість аераторів;

f_{ap} - площа одного аератора (f_{ap} – площа пластини = $0,09 m^2$).

У площу аераторів включаються і просвіти між аераторами, якщо вони не перевищують площі аератора (саме тому у формулу вводиться коефіцієнт 2).

По отриманому значенню f_{ar} визначається відношення f_{ar} / f_{at} і уточнюється значення всіх коефіцієнтів, що входять у формулу визначення питомої витрати повітря (і залежних від цього відношень), також уточнюється питома витрата повітря. Якщо прийнята в першому наближенні величина f_{ar} / f_{at} збігається з розрахунковою, то визначається інтенсивність аерації, під якою розуміється кількість повітря, що подається на $1 m^2$ площі аеротенка за 1 год.:

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

де H_{at} – глибина аеротенка.

Інтенсивність аерації не має бути нижче певної межі з тим, щоб забезпечувати належне перемішування вмісту аеротенка незалежно від потреби мула в кисні. Мінімальна інтенсивність лежить в межах від $48 m^3 / (m^2 \cdot ч)$ при глибині занурення аератора $h_a = 0,5 m$ і до $2,5 m^3 / (m^2 \cdot ч)$ при

$h_a = 6$ м. З іншого боку, інтенсивність аерації не повинна перевищувати певних значень, оскільки із-за підвищеного вмісту повітря в рідині фактична ефективність аерації знизиться в порівнянні з розрахунковими її значеннями. Максимальні значення інтенсивності залежать від відношення far / fat і змінюються від $5 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ при $far / fat = 0,05$ до $100 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ при $far / fat = 1$.

На підставі проаналізованого математичного апарату побудуємо штучну нейронну мережу. Таку мережу можна віднести до класу гібридних, оскільки формально по структурі вона ідентична багат шаровій нейронній мережі з процесом навчання, наприклад, по алгоритму зворотного поширення помилки, але приховані шари в ній відповідають етапам функціонування нечіткої системи [5].

Для моделювання була використана трьохшарова нейронна мережа прямого поширення. Були проведені експерименти з нейронними мережами, в яких використовувалися різні активаційні функції: лінійна і тангенс гіперболічний $(f(s) = \frac{2}{1 + e^{-2s}} - 1)$. Для навчання нейронної мережі був використаний популярний алгоритм зворотного поширення помилки, програмно реалізований в середовищі Matlab [6]. Як цільовий вектор був заданий параметр, що впливає на формування та подачу управляючих сигналів у ході технологічного процесу.

Отже маємо нейронну мережу, що містить наступні шари:

- 1-й шар нейронів виконує функцію введення нечіткості на основі заданих функцій приналежності входів;
- 2-й шар відображає сукупність нечітких правил;
- 3-й шар виконує функцію приведення до чіткості.

Кожен з описаних вище шарів характеризується набором параметрів (параметрами функцій приналежності, нечітких вирішальних правил, активаційних функцій, вагами зв'язків), налаштування яких виробляється, так само, як для звичайних нейронних мереж [7].

Входи, виходи і ваги гібридної нейронної мережі - є дійсні числа, що належать відрізьку $[0,1]$. Прикладом подібної мережі служить система, що має наступну базу знань:

П1: якщо $X_1 \in L_1$ і $X_2 \in L_2$ і $X_3 \in L_3$, то $z \in H$,

П2: якщо $X_1 \in H_1$ і $X_2 \in H_2$ і $X_3 \in L_3$, то $z \in M$,

П3: якщо $X_1 \in H_1$ і $X_2 \in H_2$ і $X_3 \in H_3$, то $z \in S$,

де X_1, X_2, X_3 – входні змінні,

z – вихід системи,

$L_1, L_2, L_3, H_1, H_2, H_3, H, M, S$ – деяка нечіткі множини з функціями приналежності сигмоїдального типа.

Окрім функцій приналежності для гібридних нейронних систем потрібне формулювання і введення в них так званих правил типа "якщо «умова», то

«висновок»", званих імплікаціями. Правила визначають взаємозв'язок між входами і виходами системи, примушуючи її генерувати чіткий вивід, враховуючи нечіткі передумови. Формулювання правил здійснюється експертами (технологами). Від компетентності експертів залежить коректність роботи системи управління.

Сформульовані правила для нашої інформаційно-вимірювальної системи узагальнено і введемо в систему за допомогою кнопок редактора правил Rule Editor. Наведемо тут декілька із них:

1. Якщо рівень рідини малий і кількість кисню велика, тоді кількість мула нижче середнього;
2. Якщо рівень рідини середній, то кількість кисню середня і кількість мула середня;
3. Якщо дані з лабораторії ближче до 0, то кількість мула нижче середнього;
4. Якщо рівень рідини малий, дані з лабораторії ближче до 1, кількість кисню велика, то кількість кисню слід зменшити і кількість мула слід зменшити.

На рис.2 зображено вікно редактора з побудованим за допомогою нейронної мережі графіком залежності вхідних і вихідних змінних.

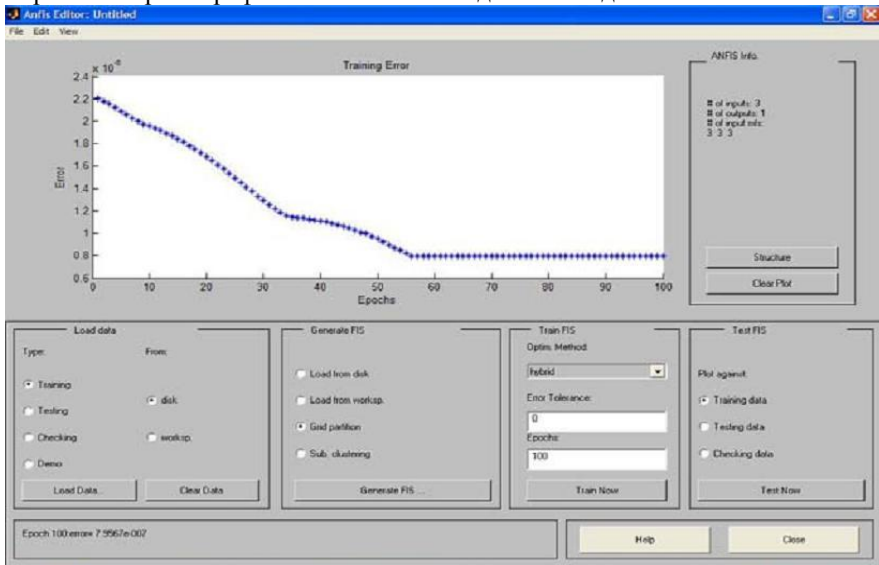


Рис. 2. Вікно редактора ANFIS з побудованим за допомогою нейронної мережі графіком залежності вхідних і вихідних змінних

Далі на рис.3 зображено вікно редактора нечіткої системи для визначення вихідних даних (управляючих сигналів).

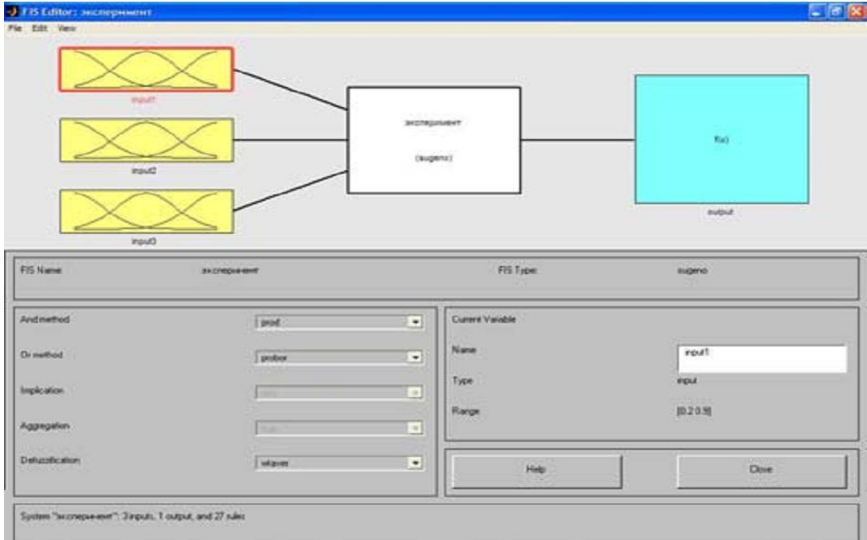


Рис. 3. Вікно редактора нечіткої системи для визначення вихідних даних (управляючих сигналів)

Далі на рис.4 зображено вікно редактора правил з фрагментом списку правил формування вихідних даних.

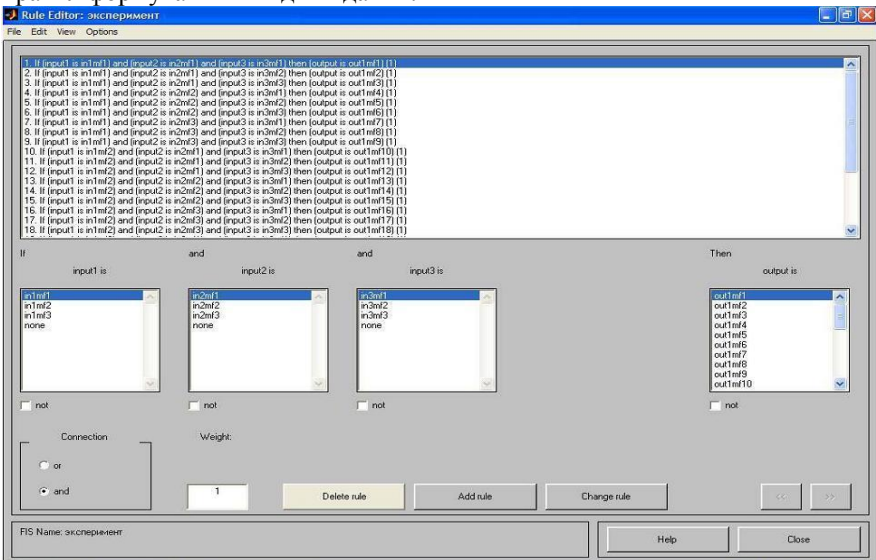


Рис. 4. Вікно редактора Rule Editor з фрагментом списку правил формування вихідних даних (у даному випадку управляючих сигналів)

На рис.5 зображена структура змодельованої нейронної мережі.

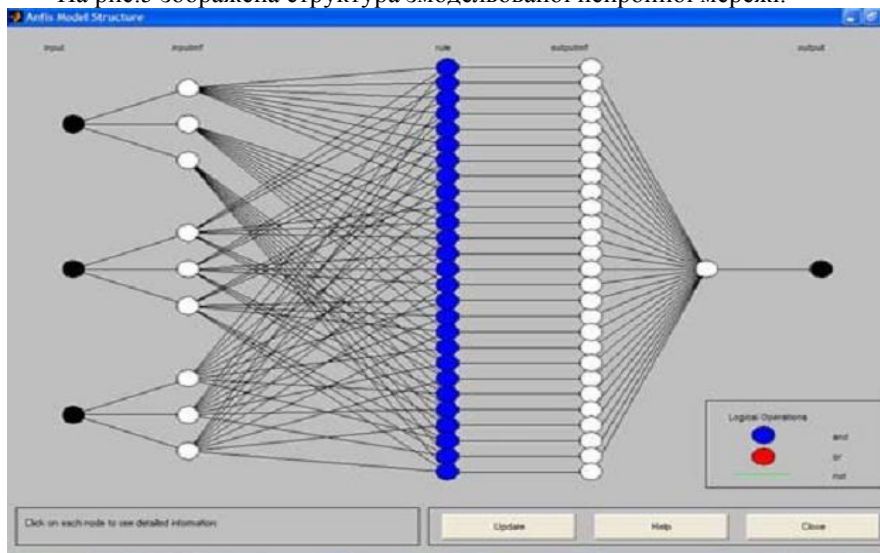


Рис. 5. Змодельована нейронна мережа

У завершенні на рис.6 зображені результати роботи нейронної мережі при поданих на її входи відповідних значеннях [0.55 0.65 0.5].

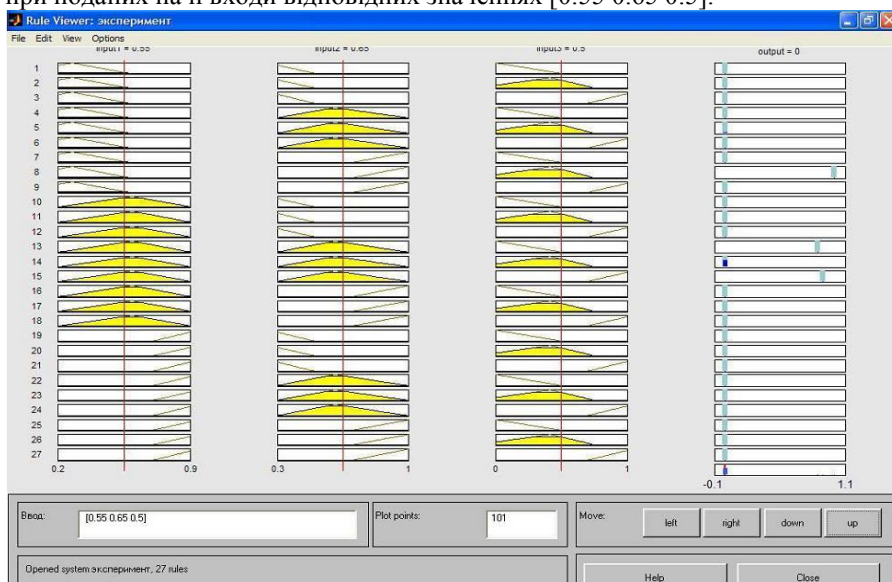


Рис. 6. Результати роботи нейронної мережі

Навчальна вибірка для нейронної мережі представлена у таблиці 1

Таблиця 1

Навчальна вибірка для нейронної мережі

Показник кислородомеру, %	Показник рівнеміра, м	Дані гідробіологічного аналізу після обробки нейронною мережею	Вихідні дані
90	0,3	1	0
70	0,5	0	0,85
50	0,7	0,9	0,9
20	1	0,7	1

Дані результати свідчать про те, що після навчання дана нейронна мережа за допомогою закладених в неї правив і обмежень (у даному випадку їх всього 27) може швидко і ефективно приймати рішення, що відповідають за формування різних дій, керуючих даним технологічним процесом.

Висновки. Розглянута вище нейронна мережа з використанням елементів нечіткої логіки, як система управління технологічним процесом біологічного очищення стічних вод здатна формувати управляючі сигнали для різних виконавчих механізмів. Коректність її роботи залежатиме від компетентності фахівців, що залучаються для формування функцій приналежності і формулювання правил роботи системи.

Використовуючи такий підхід, можна істотно підвищити ступінь автоматизації процесу, забезпечити якісне, максимально обгрунтоване і своєчасне формування управляючих сигналів. Створення інформаційно-вимірювальної системи дозволить також понизити навантаження і витрати на обслуговуючий персонал, оптимізувати витрати на електроенергію і продовжити термін життя активного мула.

Список літератури: 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, №4. -с.1-3. 3. М.П. Лапицкая. Очистка сточных вод (примеры расчетов) – Минск: Высшая школа, 1983, с. 132-145. 4. С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калицун. Водоотведение и очистка сточных вод – М.: Стройиздат 1996, с.588-594. 5. А.Н. Авернин, И.З. Батыршин. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта - М.: Мир, 1986. – 212 с. 6. В. С. Медведев, В.Г. Потемкин. Нейронные сети Matlab 6 – М.: Диалог МИФИ 2002.– 490 с. 7. Саймон Хайкин. Нейронные сети полный курс – Вильямс 2008 – 1104 с