

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
Олександр Дідик
«___» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Система нечіткого керування для очищення стічних вод від впливу
роботи промислових підприємств»**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу, групи АК-23М-1
ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
_____ Копил О.Ю.
«___» _____ 20__ р.

Керівник роботи
доцент, к.т.н.
_____ Олена ГОЛИК
«___» _____ 20__ р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“___” _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Копи́ла Олексі́я Ю́рійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. ТЕМА РОБОТИ «Система нечіткого керування для очищення стічних вод від впливу роботи промислових підприємств»

2. КЕРІВНИК РОБОТИ Голик Олена Петрівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. СТРОК ПОДАННЯ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ 23.12.2024 року

4. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ _____

Система повинна автоматично в режимі реального часу здійснювати розподіл хімічних речовин для очистки стічних вод промислового підприємства.

5. ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ Схема очисних споруд. Факторний експеримент. Моделювання роботи системи нечіткого керування. Схема водопостачання промислового підприємства.

6. КОНСУЛЬТАНТИ РОЗДІЛІВ РОБОТИ _____

Розділ (Додатки)	Прізвище, ініціали консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ З/П	НАЗВА ЕТАПІВ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	СТРОК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ РОБОТИ	ПРИМІТКА
1			
2			
3			
4			
5			
6			

ДАТА ВИДАЧІ ЗАВДАННЯ

«___» _____ 20__Р.

ПІДПИС КЕРІВНИКА

(ПРІЗВИЩЕ ТА ІНІЦІАЛИ)

ЗАВДАННЯ ПРИЙНЯТО ДО ВИКОНАННЯ

«___» _____ 20__Р.

ПІДПИС ЗДОБУВАЧА

(ПРІЗВИЩЕ ТА ІНІЦІАЛИ)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена підвищенню енергетичної ефективності процесів електро-технологічного для очищення стічних вод промислових підприємств на основі застосування адаптивних методів керування за рахунок системи нечіткого керування з нейронної мережею.

В магістерській роботі дістало подальшого розвитку теоретико-обґрунтоване застосування для очищення стічних вод промислових підприємств електро-технологічного обладнання з інтеграцією з системою нечіткого керування, що дасть змогу в порівнянні з роботою електрокаогюлятора без наявності системи автоматизації, збільшити існуючу якість очищення майже на 49%, а енергетичну ефективність – на 57%.

Виконано теоретико-експериментальні дослідження з визначення режимів очищення стічних вод підприємства в електро-технологічному обладнанні, запропоновано та розроблено алгоритм роботи системи нечіткого керування електрокаогюлятором та здійснено його моделювання роботи, запропоновано апаратну та програмну реалізацію системи нечіткого керування очисткою стічних вод промислових підприємств. Передбачені заходи з охорони праці, зокрема, розрахунок захисного заземлення.

ANNOTATION

Master's thesis is dedicated to increasing the energy efficiency of electro-technological wastewater industrial plants by implementing rational modes of using neural information systems.

In the master's work has received the further development of the theoretical rationale for the use of wastewater industrial plants complex electro-technological neural information plants using technology that allows for comparison with the work of electric coagulator without a control system to improve the quality of treatment by about 50%, energy efficiency - up to 60%.

Experimental research on the establishment of a regime of wastewater treatment in the industrial plants complex electro-technological installations, theoretical research of power engineering and wastewater industrial plants complex and justified energy efficiency modes electro technology water purification equipment; developed an algorithm for the creation of a control system neural information power engineering and installation of sewage treatment of the industrial plants; conducted simulation modes of power engineering and installation of wastewater industrial plants complex, implemented hardware and software neural information management system. Were provided measures for safety.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	
1.1 Огляд способів очистки стічних вод підприємств агропромислового спрямування.....	
1.2 Існуючі засоби та методи підвищення енергетичної ефективності роботи електричних коагуляторів для очистки стічних вод підприємств.....	
1.3 Обґрунтування доцільності автоматизації та удосконалення процесу електричної коагуляції для очистки стічних вод підприємства.....	
1.4 Висновки до розділу.....	
2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ.....	
2.1 Теоретико-експериментальні дослідження системи.....	
2.2 Визначення взаємозв'язку параметрів електричного коагулятора при очищенні стічних вод підприємств.....	
2.3 Висновки до розділу.....	
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СНК ОЧИЩЕННЯМ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ...	
3.1 Розробка математичної моделі електричного коагулятора....	
3.2 Обґрунтування використання нейронних сіток та нечіткої логіки для побудови СНК очищенням стічних вод підприємств.....	
3.3 Висновки до розділу.....	

4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СНК ОЧИЩЕННЯМ СТИЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	
4.1 Розробка нейронної нечіткої моделі. Навчання системи та налаштування параметрів.....	
4.2 Побудова функцій належності та результати моделювання.....	
4.3 Перевірка адекватності розроблених моделей.....	
4.4 Висновки до розділу.....	
5. АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СНК ОЧИЩЕННЯМ СТИЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	
5.1 Схемотехнічна реалізація.....	
5.2 Програмна реалізація СНК.....	
5.3 Висновки до розділу.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
ДОДАТКИ.....	

ВСТУП

Актуальність теми. Якість води в водних поверхневих об'єктах являється головним фактором санітарно-епідеміологічного благополуччя населення. В той же самий час більшість басейнів річок є забрудненими (в тому числі внаслідок військових дій), а також внаслідок скидання погано очищених/неочищених стічних вод промислових підприємств.

Вартість електроенергії є головною складовою матеріальних витрат на очистку стічних вод. Завданню забезпечення та підтримання в установлених межах норм якості води і можлива загроза виникнення дефіциту води необхідних показників внаслідок скидання погано очищених/взагалі неочищених стічних вод потребує синтезованого підходу для розв'язання таких проблем.

Стічні води промислових підприємств за багатьма параметрами суттєво перевищують кількісні показники встановлених норм стосовно скидання у водойми. До ефективно раціональних технологій очищення води від частинок, що зависли відносяться електрокоагуляційні методи [1–11].

Однак процеси електроочищення в електротехнологічних установках супроводжуються перевитратами електроенергії і зменшенням стану очистки, в залежності від вхідних параметрів стічних вод (в тому числі завислих частинок та конструктивних параметрів) [6-9, 11-13]. І це є проблемою.

Для вирішення цих проблем та підвищення якості очистки води належать методи з використанням адаптивних систем керування, які здатні підтримувати технологічно необхідні параметри цих процесів в раціонально енергоефективних межах з урахуванням умов та дотриманням вимог стосовно якості очистки води [7, 11, 13-16].

Об'єктом дослідження процеси електро-технологічного очищення стічних вод промислових підприємств.

Предметом дослідження методи керування процесами в електротехнологічних установках для очищення води з урахуванням впливу параметрів

на енергетичну ефективність та якість очистки стічних вод промислових підприємств.

Мета та задачі дослідження - є удосконалення, шляхом підвищення енергетичної ефективності процесу керування електро-технологічною очисткою стічних вод промислових підприємств, за рахунок визначення раціональних режимів роботи процесу на основі системи нечіткого керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- виконати експериментально-теоретичні дослідження процесу електро-технологічного очищення стічних вод промислових підприємств;
- обґрунтувати енергетичну ефективність режимів роботи очистки води за допомогою електро-технологічних установок;
- виконати моделювання роботи електро-технологічного обладнання для очищення стічних вод промислового підприємства;
- розробити апаратну та програмну реалізацію системи нечіткого керування електро-технологічним обладнанням для очистки стічних вод промислового підприємства.

Методи дослідження: тепло масообмін, теорія автоматичного керування, нечіткі множини, нейроні мережі, статистична обробка даних, використання комп'ютерних технологій, математичне моделювання, планування експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів: удосконалено теоретичне обґрунтування необхідності використання для очищення стічних вод промислових підприємств електро-технологічного обладнання на основі застосування нечітких множин та нейронних мереж та нейрокомп'ютерів, що на відміну від роботи електрокоагулятора, який не містить таку систему нечіткого керування, дасть змогу підвищити якість очищення майже на 42%, а енергетичну ефективність приблизно на 54%.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані технічні та конструктивні параметри електро-технологічного обладнання для очищення

стічних вод промислових підприємств від частинок, що зависли, можна застосовувати та реалізовувати на різних промислових об'єктах.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, висновки і рекомендації, які представлені в магістерській роботі, обґрунтовано відповідними посиланнями на літературні джерела, коректним використанням математичного апарату та методів комп'ютерного моделювання.

1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Огляд способів очистки стічних вод підприємств агропромислового спрямування

Одним з основних представників промислових підприємств агропромислового спрямування є птахофабрики. Як приклад, в табл. 1.1 наведені потреби у воді таких підприємств [1, 2, 8, 11, 19].

Таблиця 1.1 - Вимоги для води типових підприємств агропромислового спрямування

Промислові зони	Птахофабрика потужністю 10 млн бройлерів за рік		Птахофабрика потужністю 400 тис. кур-несучок	
	вода питна, м³/добу	вода технологічна, м³/добу	вода питна, м³/добу	вода технологічна, м³/добу
Ремонтний молодняк	3,13	117,5	3,2	53,4
Промислове стадо	21,0	716,1	6,9	471,1
Батьківське стадо	1,5	28,0	1,1	85,2
Цех інкубації	2,6	28,5	5,2	81,9
Забійний цех	12,9	582,0	26,3	1100,0
Дезінфекція	-	-	1,9	36,6
Котельня	3,0	442,5	23,0	1200,0
Всього	44,13	1914,6	67,6	3028,2

Воду використовують в обсязі – 3530 м³/добу, що становить приблизно 1060840 м³/рік [11, 19]. Зі свердловин воду закачували в резервуар (в ньому робили усереднення), а після чого ця вода надходила у башту і з башти до споживачів.

На рис. 1.1 показана схема очисних споруд типового агропромислового підприємства на прикладі птахофабрики [19].

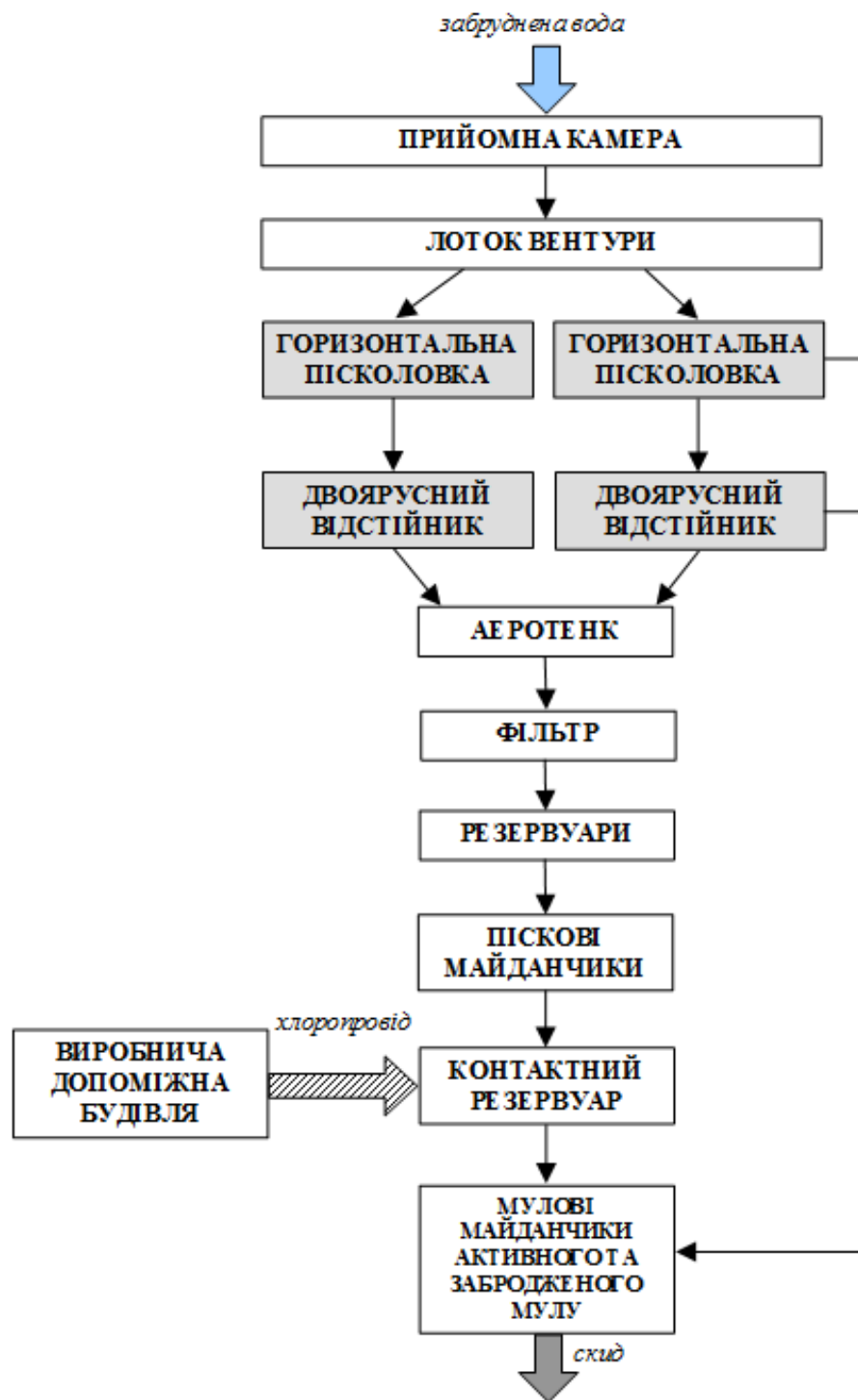


Рисунок 1.1 - Схема очисних споруд типового агропромислового підприємства (птахофабрика)

До складу системи входять [6, 19]:

- каналізаційні відстійники;
- дренажні;
- прийомна камера;
- блоки аеротенків;
- каналізаційні насоси перекачування мулу;
- лоток Вентурі;
- пункт хлорування;
- горизонтальні пісколовки;
- прийомний резервуар;
- будівлі фільтрів;
- комплектні трансформаторні підстанції;
- контактний резервуар;
- піскові майданчики;
- мулові майданчики.

У пісколовці затримуються мінеральні домішки (пісок). Через прийомну камеру у водовимірjuвальний лоток спочатку надходять стоки. Ці стоки надходять після пісколовки в двохярусні відстійники. У відстійниках також відбувається затримка речовин, що зависли, та процес бродіння осаду. Після чого цей осад надходить (сам по собі) до мулових майданчиків. Аеротенки призначені для біологічної очистки (після попередньої механічної очистки), шляхом подовженої аерації в блокованих відстійниках. Аерація мулової суміші проходить в аеротенках, а відстоювання цієї суміші у відстійниках.

Активний мул (який осів у відстійниках)→повертається в голову аеротенка. Відстояна вода→на доочищення на піскових фільтрах→контактні резервуари виконують дезінфекцію очищених стоків на основі хлору/хлорного вапна→потім стоки, як правило, потрапляють у річку.

Для подальшої утилізації та просушування беруть осад з контактних резервуарів та надлишковий активний мул.

В цій схемі головними проблемами є [11, 19]:

- застосування хлору з метою знезаражування стічної води;
- підвищення окисності в результаті збільшення норм вмісту речовин органічних.

Таким чином можна сказати, що біологічна очистка стічних вод в аеротенках подовженої аерції є неефективною, оскільки після очистки залишаються завислі частинки, речовини органічні, каламутна вода тощо. В результаті приходимо до висновку щодо необхідності застосування інших більш дієвих та продуктивніших методів і засобів очищення води.

Пропонується синтез методів, які полягають у адаптації системи очистки в режимі реального часу на певному виробництві. Це дозволить забезпечити норми показників забруднюючих стічних вод, і як наслідок, покращити навколишнє середовище, ресурсо-збереження, а також скоротити енергетичні витрати, пов'язані з очищенням води.

Одним з таких методів, є використання електро-технологічних установок - електрокоагуляторів. З їх допомогою можна якісно та ефективно виконати фізично-хімічну, а також біологічну очистку [6, 10, 11, 19].

1.2. Існуючі засоби та методи підвищення енергетичної ефективності роботи електричних коагуляторів для очистки стічних вод підприємств

Коагуляція - це взаємне притягання та злипання частинок. Для цього необхідно враховувати наявність сили відштовхування. При процесі коагуляції всі колоїдні частинки в рідині через відрив протоіонів від подвійного шару електричного (ПШЕ) повинні мати певний електричний заряд. під час обробки хімічної у воді використовують гідрооксиди алюмінію/заліза (нестабільні компоненти). Щоб відбулась коагуляція колоїдних частинок (які присутні у воді) є потреба застосовувати сірчасто-кислий алюміній та хлорне залізо [1, 9, 11-19].

Електролітичне дозування реагенту розчиненням електродів відбувається при електрокоагуляції води. Гідрооксид металу отримується після взаємної дії води та

продуктів розчинення. У воді, яку очистили, створюється адсорбція частинок-забруднювачів, які володіють сильною адсорбційною здатністю.

Також під час електрокоагуляції може бути залипання частинок води, яке відбувається внаслідок наявності дії електричного поля. Отже, як наслідок, може зменшитися товщина ПШЕ та сила електростатичного відштовхування.

Проаналізувавши дослідження авторів [2, 6, 7, 11-22] можна виокремити наступні процеси, що відбуваються при електрокоагуляції:

- залипання частинок шляхом зростання їх зіткнень в електрореакторі під час змішування (гідродинамічна коагуляція);
- дипольна взаємна дія частинок колоїдних шляхом дії протягуючих сил через накладання електричного поля (поляризаційна коагуляція);
- взаємна дія частинок під час уведення потенціалостворюючих іонів металів на сонові електро-хімічного розчину електродів (електролітична коагуляція);
- взаємна дія частинок під час зміни їхнього заряду шляхом зміни фізикохімічних властивостей розчину в шарах між електродами та приелектродних шарах (електрохімічна коагуляція);
- підвищення зустрічних зіткнень частинок та їх залипання шляхом зростання певних концентрацій частинок в просторі між електродами (концентраційна коагуляція).

Вагомий вплив даних складових на електрокоагуляцію забруднювачів визначається розмірами та електричними властивостями останніх, матеріалом електродів, технологічними параметрами, іонним складом води тощо.

Процес очищення за допомогою електрокоагуляторів можна розбити на таку етапи [2, 6, 7, 11-22]:

1. Гідроліз іонів з попереднім отриманням електрозгенерованого коагулянта, за допомогою анодних розчинень металу електродів у воді, що очищують;
2. Коагуляція частинок-забруднювачів колоїдних та дисперсних у результаті їх взаємної дії з коагулянтом;
3. Випадіння забруднювачів в осад;

4. Розчинення металів електродів та післяутворення адсорбційного активного гідрооксиду металу;

5. Розчинення електролітичне металу анода шляхом взаємної дії очищуваної води з електричним струмом;

6. Розчинення електроду при відсутності накладання до зовнішнього кола напруги через вплив взаємної дії та оточуючого навколишнього середовища.

Розчинення аноду та енергоємність процесу залежить від наступних чинників [2, 6, 7, 11-22]:

- густини струму на електродах;
- швидкості руху води, яку очищують;
- температури води, яку очищують;
- активної реакції води, яку очищують, тобто її рН;
- складу води, яку очищують;
- тиску в просторі між електродами.

Оскільки процес електрокоагуляції є досить складним, то присутні також зовнішні збурюючі фактори, такі як [2, 6, 7, 11-22]:

- вібрація;
- опромінення.

Щоб процес відбувався якісно та ефективно потрібне виконання певних умов, таких як [2, 6, 7, 11-22]:

- для утворення молекул необхідно забезпечити достатню концентрацію аніонів;
- наявність необхідної високої швидкості іонізації в шарі при електродах;
- забезпечення можливості з перерозподілом електронів та сорбуючих аніонів між іонів кристалічної решітки металу;
- щоб у аніонів була наявна сорбція, яка створює молекули з іонами кристалічної решітки металу;
- можливий відрив молекули від поверхні електроду.

1.3. Обґрунтування доцільності автоматизації та удосконалення процесу електричної коагуляції для очистки стічних вод підприємства

Електрокоагулятори для очищення стічних вод підприємств це складно керований об'єкт, оскільки при протіканні процесу відбувається взаємна дія частинок колоїдно-дисперсійних систем з утворенням коагулянта. Внаслідок чого стабільність дисперсних систем порушується та відбувається збільшення частинок. Для вирішення цієї проблеми доцільно розробити автоматизовану систему керування процесом електрокоагуляції, що дозволить суттєво збільшити якість та енергетичну ефективність процесу очищення води [11, 17, 19, 21].

Досягнення цієї мети дозволить зменшити енергетичні витрати на процес, врахувати амортизаційне зношення обладнання, забезпечити комп'ютерно-інтегровану систему технологічної лінії з безперервністю технологічного процесу.

Якщо застосовувати електрокоагулятори без системи автоматизації, то скоріше за все будуть наявні перевитрати електричної енергії та/або очищення стоків буде неякісним. Наявні системи автоматизації розроблені для стаціонарних режимів без урахування впливу зовнішніх збурюючих факторів. В роботах [11, 17, 19, 21] також зазначають такі складнощі, пов'язані з синтезом автоматизованих систем керування:

- немає методів для автоматичного вимірювання значної кількості вхідних та збурюючих показників;
- наявність багатьох факторів (електричні, фізикохімічні, гідравлічні) параметрів процесу;
- немає в наявності повної інформації стосовно процесу;
- низька точність та швидкодія аналізаторів складу води.

Головними параметрами, які здійснюють вплив на енергетичну ефективність і стабільність електрокоагуляції є [11, 17, 19, 21]: значні витрати електричної енергії; технологічні витрати електричної енергії.

Таким чином доцільним є застосування адаптивних систем керування, які здатні прилаштуватися до зовнішніх умов процесу роботи та здійснювати пошук значень керуючих впливів в умовах невизначеності.

До них можна віднести нечіткі системи керування, нейронні мережі, штучний

інтелект, нейрокомп'ютери тощо.

Метою є виведення параметру концентрації у стічних водах частинок, що зависли. Густина анодного струму буде в якості керуючого впливу. Таким чином вхідними параметрами при розробці системи автоматизації очищення стічних вод промислового підприємства візьмемо:

- активну реакцію рН стічних вод підприємства;
- концентрацію частинок, що зависли у стічних водах;
- швидкість потоку стічних вод у просторі між електродами.

Таким чином можна окреслити наступні завдання для кваліфікаційної роботи:

1. З метою визначення режимів очищення стічних вод підприємства виконати теоретико-експериментальні дослідження та обґрунтувати параметри;
2. З метою встановлення режимів енергоефективної роботи обладнання для очищення води виконати теоретичні дослідження процесу електрокоагуляції стічних вод підприємства.
3. Розробити алгоритм роботи системи нечіткого керування (СНК) електро-технологічним обладнанням для очищення стічних вод промислового підприємства.
4. Виконати моделювання роботи СНК разом з електро-технологічною установкою для очищення стічних вод промислового підприємства.
5. Запропонувати апаратну та програмну реалізацію СНК для очищення стічних вод промислового підприємства.

1.4. Висновки до розділу

1. Визначено, що параметри з якості стічних вод промислових підприємств не відповідають встановленим нормам, а існуючі засоби та системи розроблені для стаціонарних систем. Тому запропоновано застосування адаптивних методів для очищення стічних вод промислового підприємства.

2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1. Теоретико-експериментальні дослідження системи

Процес очищення стічних вод підприємств включає багато взаємно пов'язаних факторів, але вони носять стохастичний характер, який можна передбачити, але з певною імовірністю. Визначимо таку математичну модель за допомогою статистичних методів [1, 6, 11-22, 24-27].

Виконаємо моделювання для визначення ефективних та мало-енергозатратних режимів роботи електричного коагулятора, але при цьому необхідно забезпечити норми очистки води. Найкраще цю норму визначати за концентрацією частинок, що зависли на вході і виході, а також за витраченою енергією на сам процес очистки.

На електрокоагуляцію стічних підприємств впливають наступні чинники фактори [21, 25]:

- Густина струму анодного;
- Значення кислотності рН вхідної води;
- Швидкість потоку води у просторі між електродами;
- Концентрація частинок, що зависли на вході електротехнологічної установки (ЕТУ);
- Концентрація частинок, що зависли на виході ЕТУ;
- Витрачена електрична енергія на безпосередньо сам процес.

Вибір факторів, а також рівнів зміни факторного простору обґрунтовувалися за результатами попередніх експериментальних досліджень [21, 25].

При моделюванні було введено таку змінні:

- густину анодного струму – x_1 ;
- кислотність рН води на вході – x_2 ;
- лінійну швидкість потоку у просторі між електродами – x_3 ;
- вхідну концентрацію частинок, що зависли – x_4 .

Після чого було побудовано матрицю чотири-факторного експерименту, яка наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – План-матриця експерименту для дослідження

<i>N</i>	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>N</i>	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>N</i>	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄
1	1	-1	-1	-1	7	-1	-1	1	1	13	-1	1	-1	0
2	-1	1	-1	-1	8	1	1	1	1	14	-1	0	1	1
3	-1	-1	1	-1	9	0	0	0	0	15	0	1	1	-1
4	1	1	1	-1	10	0	1	-1	1	16	1	-1	1	0
5	1	-1	-1	1	11	-1	0	-1	-1	17	1	-1	0	1
6	-1	1	-1	1	12	1	0	1	1	18	0	-1	1	-1

Визначник [30, 35, 37]:

$$d_{cp} = \frac{\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \dots \int_{-1}^1 f'(x) M^{-1}(\xi) \cdot f(x) dx_1 \dots dx_n}{2^n}, \quad (2.1)$$

Визначник дорівнює $d_{cp}=20,78$; відповідно $d_{min}=137,9980$; $d_{max}=6,49$.

Обробку математичних даних рекомендовано [37] виконувати у декілька етапів:

- I. Статистичну обробку експериментальних (теоретичних) даних;
- II. Розробку матмоделі з апроксимацією цих даних;
- III. Перевірку адекватності матмоделі та її максимальної похибки.

З метою реалізації цих етапів було застосовано наступні вирази:

Середнє значення всіх вимірювань при досліді:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, \quad (2.2)$$

де n – кількість спостережень; i – номер спостереження;

Абсолютна похибка i -того значення вимірюваної величини:

$$\Delta Y_i = Y_i - \bar{Y}, \quad (2.3)$$

Дисперсія:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (2.4)$$

де $n-1$ – число ступенів свободи.

Середнє квадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (2.5)$$

Однорідність за критерієм Фішера (F -критерій):

$$F = S_{\max}^2 / S_{\min}^2, \quad (2.6)$$

Рівень імовірності був прийнятий на $P=95\%$ (рівень значимості $q=5\%$, помилка $\pm 3S$).

За таблицями [37] було знайдено значення F_{KP} .

За критерієм Ст'юдента (t -критерій):

$$t = (|Y_C - \bar{Y}|) / S_{Y_i}, \quad (2.7)$$

Якщо $t > t_{KP}$, то результат є помилкою.

Перевірка на адекватність за критерієм Фішера [36].

Дисперсія адекватності:

$$S_{Ad}^2 = \frac{n}{N - g} \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_{iE} - Y_T)^2, \quad (2.8)$$

де $N-g$ – число степенів вільності дисперсії адекватності;

g – число значимих коефіцієнтів у теоретичному рівнянні;

$\bar{Y}_{iE}$ – середнє значення відгуку в i -му досліді;

Y_T – значення відгуку в i -й точці, обчислене за теоретичним рівнянням або рівнянням регресії; i дисперсію відтворення досліду.

Умова адекватності щоб $F_p < F_T$.

Застосувавши програми Mathcad Professional та Statistica було виконано обробку статистичних (теоретико-експериментальних) даних. Рівні варіювання було обрано відповідно до рекомендацій, наданих в [30, 35, 37], основних технологій виробництва типових підприємств [18] та досліджень якості скиду підприємств, показані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Рівні варіювання чинників

Фактор	Позначення	Рівень “-1”	Рівень “0”	Рівень “+1”
i, А/дм.кв	X_1	0,1	0,65	1,2
рН	X_2	3	5	7
V, м/год	X_3	2	4	6
C, г/л	X_4	0,5	1,75	3

В табл. 2.3 наведені результати багатофакторного експерименту для дослідження процесу очистки стічних вод на основі електрокоагулятора.

Значення кислотності змінювали від 3 до 7 (оскільки середовище може бути кислим, нейтральним та в перехідному стані).

Таблиця 2.3 – Результати експерименту

Експеримент	i , А/дм.к В	pH	V , м/год	C_{ex} , г/л	$C_{вих}$, мг/л	P , Вт
1	1,2	3	2	0,5	4,54	7,65
2	0,1	7	2	0,5	0,13	0,29
3	0,1	3	6	0,5	13,69	9,75
4	1,2	7	6	0,5	8,18	29,10
5	1,2	3	2	3	25,47	13,31
6	0,1	7	2	3	27,29	4,78
7	0,1	3	6	3	41,86	15,43
8	1,2	7	6	3	44,64	37,59
9	0,65	5	4	1,75	18,97	13,85
10	0,65	7	2	3	27,26	11,15
11	0,1	5	2	0,5	2,78	0,52
12	1,2	5	6	3	43,49	33,29
13	0,1	7	2	1,75	12,11	2,27
14	0,1	5	6	3	43,58	18,37
15	0,65	7	6	0,5	8,72	21,38
16	1,2	3	6	1,75	25,84	24,33
17	1,2	3	4	3	32,88	20,25
18	0,65	3	6	0,5	13,11	14,96

2.2. Визначення взаємозв'язку параметрів електричного коагулятора при очищенні стічних вод підприємств

Маємо для вихідної концентрації частинок, що зависли:

$$C_{вих} = 4,46 - 0,119 \cdot i - 0,88 \cdot pH + 0,186 \cdot V + 0,913 \cdot C_{ex} - 0,083 \cdot i^2 - 0,125 \cdot i \cdot pH - 0,061 \cdot i \cdot V + 0,376 \cdot i \cdot C_{ex} - 0,057 \cdot pH^2 + 0,055 \cdot pH \cdot V + 0,727 \cdot pH \cdot C_{ex} + 0,173 \cdot V^2 + 0,827 \cdot V \cdot C_{ex} + 0,906 \cdot C_{ex}^2 \quad (2.9)$$

При цьому: рівень ймовірності=0,95; коефіцієнт множинної детермінації=0,99; коефіцієнт множинної кореляції=0,99; стандартне відхилення оцінки становить 1,67.

Маємо для потужності, яку витратили для процесу електрокоагуляції стічних вод підприємства:

$$\begin{aligned}
P = & -3,077 + 0,955 \cdot i + 0,075 \cdot \text{pH} + 0,162 \cdot V + 0,152 \cdot C_{\text{вх}} + 0,963 \cdot i^2 + 0,876 \cdot i \cdot \text{pH} + \\
& + 0,802 \cdot i \cdot V + 0,723 \cdot i \cdot C_{\text{вх}} - 0,072 \cdot \text{pH}^2 + 0,273 \cdot \text{pH} \cdot V + 0,082 \cdot \text{pH} \cdot C_{\text{вх}} + 0,154 \cdot V^2 + \\
& + 0,201 \cdot V \cdot C_{\text{вх}} + 0,17 \cdot C_{\text{вх}}^2
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

При цьому: рівень ймовірності=0,95; коефіцієнт множинної детермінації=0,99; коефіцієнт множинної кореляції=0,99; стандартне відхилення оцінки становить 0,58.

Статична модель якості має чіткий нелінійний характер. На рис. 2.1 та рис. 2.2 показані графічні залежності за двома вхідними параметрами. При цьому було задано середні значення з діапазону, а інші змінювались.

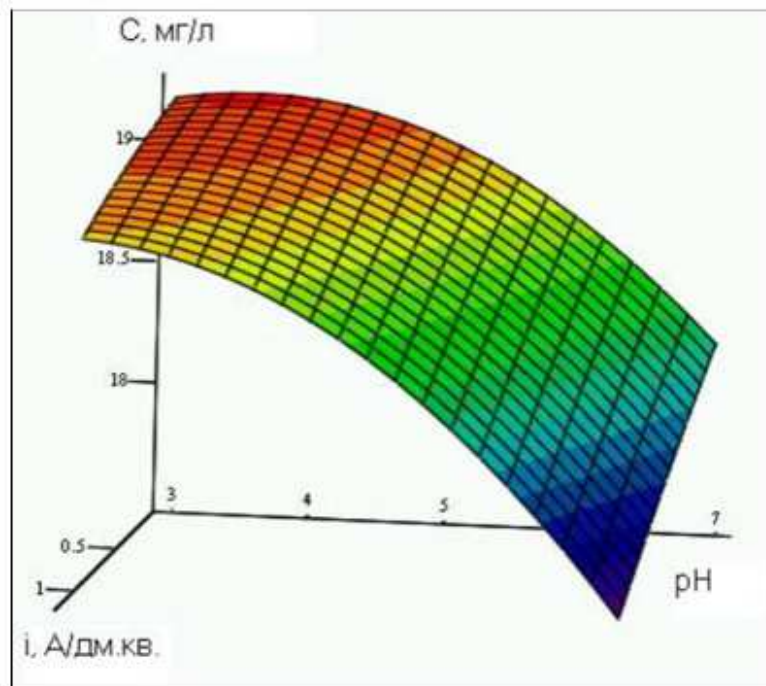


Рисунок 2.1 – Залежність концентрації завислих частинок на виході з електрокоагулятора від густини струму та рН при лінійній швидкості потоку – 4 м/год. та початковій концентрації завислих частинок – 1,75 г/л.

Як видно з рис. 2.1 при збільшенні густини анодного струму i приблизно лінійно також йде процес збільшення якості очищення, тобто зниження концентрації частинок, що зависли при стаціонарному стані інших параметрів. При

значеннях рН від 3 до 5 ефект очищення зростає поступово, а після того як значення рН=5 настає різке зниження концентрації частинок, що зависли.

На рис. 2.2 наведено залежність концентрації частинок, що зависли на виході електричного коагулятора, від швидкості потоку у просторі між електродами та концентрації частинок, що зависли на вході.

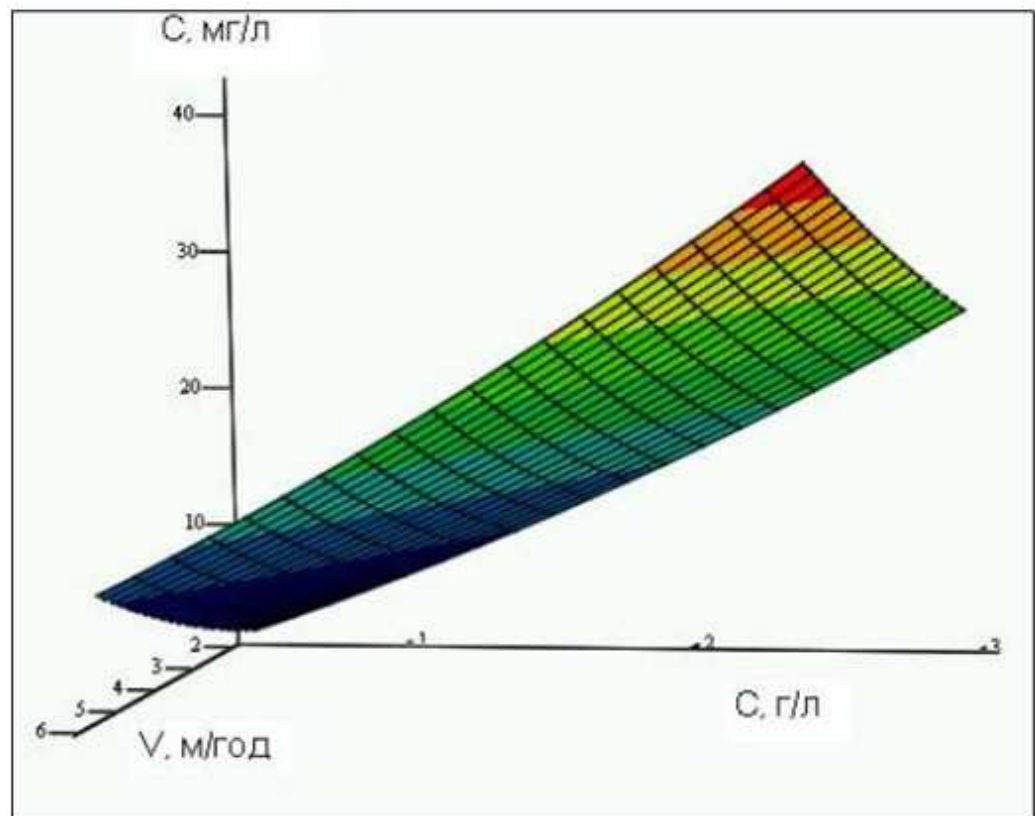


Рисунок 2.2 – Залежність концентрації завислих частинок на виході з електрокоагулятора від швидкості потоку у між електродному просторі та вхідної концентрації завислих частинок при густині анодного струму – 0,65 А/дм² та рН – 5.

Зростання швидкості потоку у просторі між електродами негативно впливає на процес електрокоагуляції. Досить суттєво погіршується та знижується інтенсивність очищення з лінійною швидкістю 4 м/год. та більше.

Як бачимо з рис. 2.2 зі зростанням вхідної концентрації частинок, що зависли, та при постійності інших параметрів, то вихідна концентрація частинок, що зависли, буде збільшуватися. Зростання відбувається в діапазоні від 0,5 до 1 г/л (поступово), а вже в діапазоні від 1 до 3 г/л буде різкий нелінійний характер.

Зі зростанням густини анодного струму також збільшуються енергетичні затрати на процес електрокоагуляції. Відповідно до рис. 2.3 бачимо, що найбільш різке зростання відбувається у діапазоні значень густини анодного струму i від 0,8 до 1,2 А/дм².

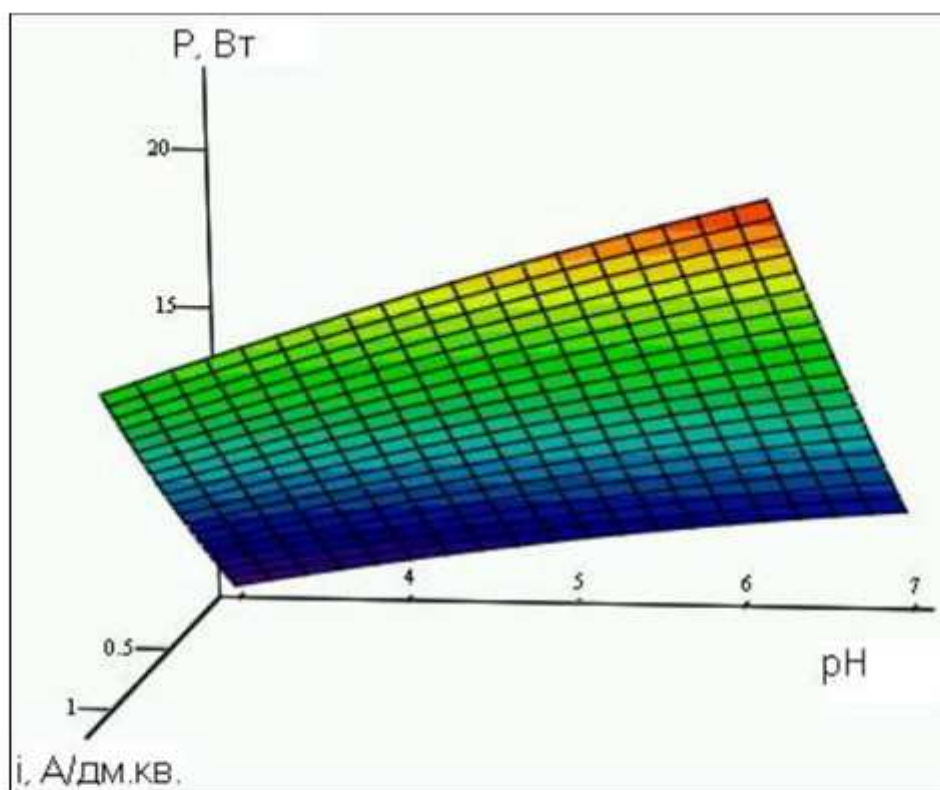


Рисунок 2.3 – Залежність затраченої на електрокоагуляцію потужності від густини струму та рН при лінійній швидкості потоку у між електродному просторі 4 м/год. та початковій концентрації завислих частинок 1,75 г/л.

На рис. 2.4 представлено графічну залежність витраченої при електрокоагуляції потужності від швидкості потоку у просторі між електродами та вхідною концентрацією частинок, що зависли.

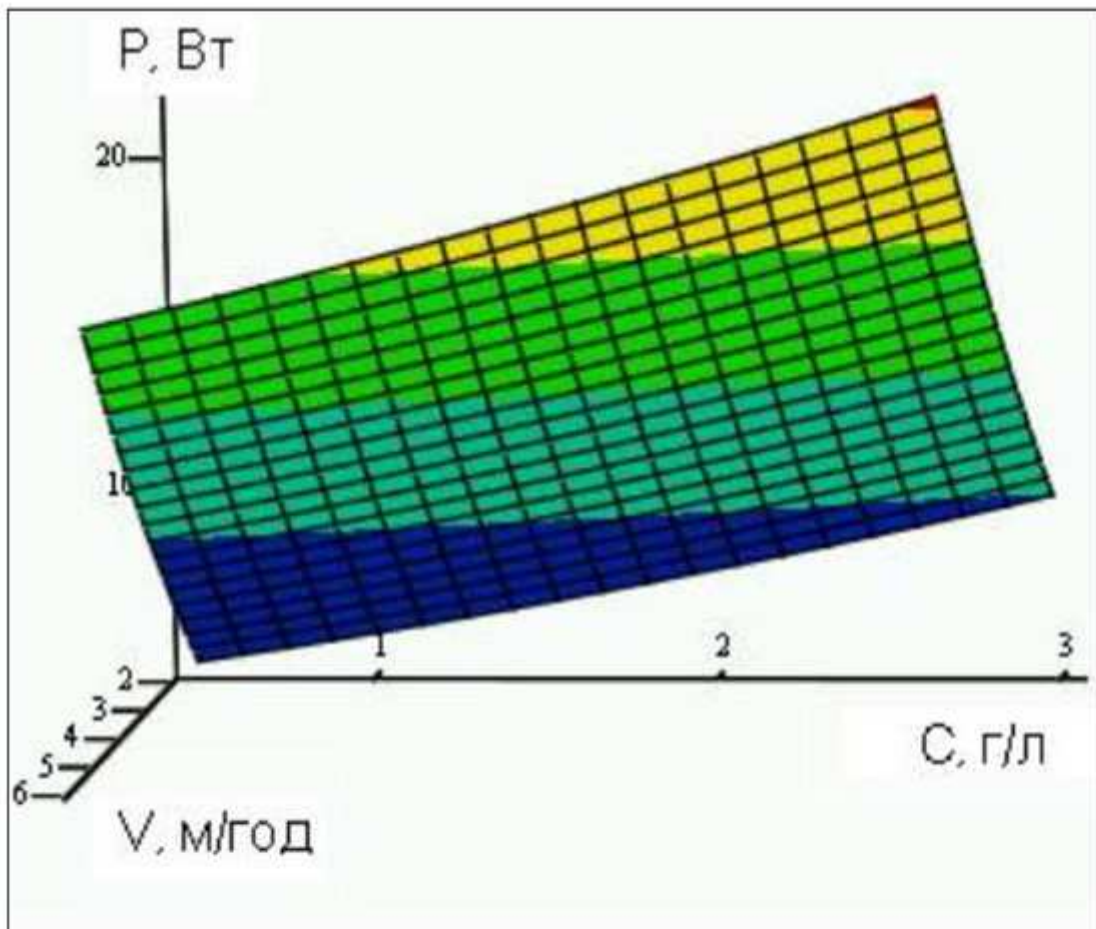


Рисунок 2.4 – Залежність затраченої на електрокоагуляцію потужності від швидкості потоку в між електродному просторі та вхідною концентрацією завислих частинок при густині анодного струму – $0,65 \text{ А/дм}^2$ та $\text{pH} = 5$.

Безпосереднє зростання швидкості потоку у просторі між електродами також сприяє зростанню енергетичних затрат на процес, але ця зміна є поступовою, і тільки в діапазоні від 3 до 4 м/год. можна побачити незначну інтенсифікацію.

Після чого було виконано розрахунки для визначення максимально енергетично ефективної якості очищення електричним коагулятором, забезпечивши при цьому оптимально мінімальні енергетичні витрати. Маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{\text{сух}}}{di} = -0,119 - 0,116 \cdot i - 0,125 \cdot pH - 0,0061 \cdot V + 0,376 \cdot C_{\text{сх}} \\ \frac{dC_{\text{сух}}}{dpH} = -0,88 - 0,114 \cdot pH - 0,125 \cdot i + 0,055 \cdot V + 0,727 \cdot C_{\text{сх}} \\ \frac{dC_{\text{сух}}}{dV} = 0,186 + 0,346 \cdot V - 0,061 \cdot i + 0,055 \cdot pH + 0,827 \cdot C_{\text{сх}} \\ \frac{dC_{\text{сух}}}{dC_{\text{сх}}} = 0,913 + 1,812 \cdot C_{\text{сх}} + 0,376 \cdot i + 0,727 \cdot pH + 0,827 \cdot V \end{array} \right. , \quad (2.11)$$

початкові умови:

$$DC_{\text{ВНХ}}/DI = 0; C_{\text{ВНХ}} = C_0; I = 0;$$

$$DC_{\text{ВНХ}}/DPH = 0; C_{\text{ВНХ}} = C_0; PH = 0;$$

$$DC_{\text{ВНХ}}/DV = 0; C_{\text{ВНХ}} = C_0; V = 0;$$

$$DC_{\text{ВНХ}}/DC_{\text{БХ}} = 0; C_{\text{ВНХ}} = C_0; C_{\text{БХ}} = 0.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{di} = 0,955 + 1,926 \cdot i + 0,876 \cdot pH + 0,802 \cdot V + 0,723 \cdot C_{\text{сх}} \\ \frac{dP}{dpH} = 0,075 - 0,144 \cdot pH + 0,876 \cdot i + 0,273 \cdot V + 0,082 \cdot C_{\text{сх}} \\ \frac{dP}{dV} = 0,162 + 0,308 \cdot V + 0,802 \cdot i + 0,273 \cdot pH + 0,201 \cdot C_{\text{сх}} \\ \frac{dP}{dC_{\text{сх}}} = 0,152 + 0,34 \cdot C_{\text{сх}} + 0,723 \cdot i + 0,082 \cdot pH + 0,201 \cdot V \end{array} \right. , \quad (2.12)$$

початкові умови:

$$DP/DI = 0; P = P_0; I = 0;$$

$$DP/DPH = 0; P = P_0; PH = 0;$$

$$DP/DV = 0; P = P_0; V = 0;$$

$$DP/DC_{\text{БХ}} = 0; P = P_0; C_{\text{БХ}} = 0.$$

В табл 2.4 наведено значення чинників, що є енергоефективними для подальших досліджень. Попередньо праві частини виразів 2.11 та 2.12 було прирівняно до 0 (із застосуванням програми Mathcad Professional).

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку енергоефективних значень факторів при дослідженні електрокоагулятора

Затрачена потужність, Вт				Вихідна концентрація завислих частинок, мг/л			
$i, \text{A/дм}^2$	pH	$V, \text{м/год}$	$C_{\text{вх}}, \text{мг/л}$	$i, \text{A/дм}^2$	pH	$V, \text{м/год}$	$C_{\text{вх}}, \text{мг/л}$
0,62	5,38	4,91	2,02	0,32	6,37	3,22	0,72

При аналізі матмоделей виразів 2.9 та 2.10 застосовувалась задача на основі методів двовірних перерізів. Цільовою функцією є енергетичні затрати. При побудові двовірних перерізів було використано оптимальні значення інших (2) факторів. Реалізація цього методу була здійснена в програмі Statistica. Результати показані на рис. 2.5. Енергетично ефективні значення чинників було зведено у табл. 2.5 (витрачена потужність, якість очищення, концентрація частинок, що зависли на виході з електричного коагулятора)

Таблиця 2.5 – Енергоефективні значення параметрів електрокоагуляції стічних вод підприємства

$I, \text{A/дм}^2$	pH	$V, \text{м/год}$	$C_{\text{вх}}, \text{г/л}$	$P, \text{Вт}$	$C_{\text{вих}}, \text{мг/л}$
0,49	6,18	3,93	1,53	9,72	33,41

При цьому маємо такі параметри:

$$A - V = 3,22 \text{ М/ГОД.}, C_{\text{ВХ}} = 0,72 \text{ Г/Л};$$

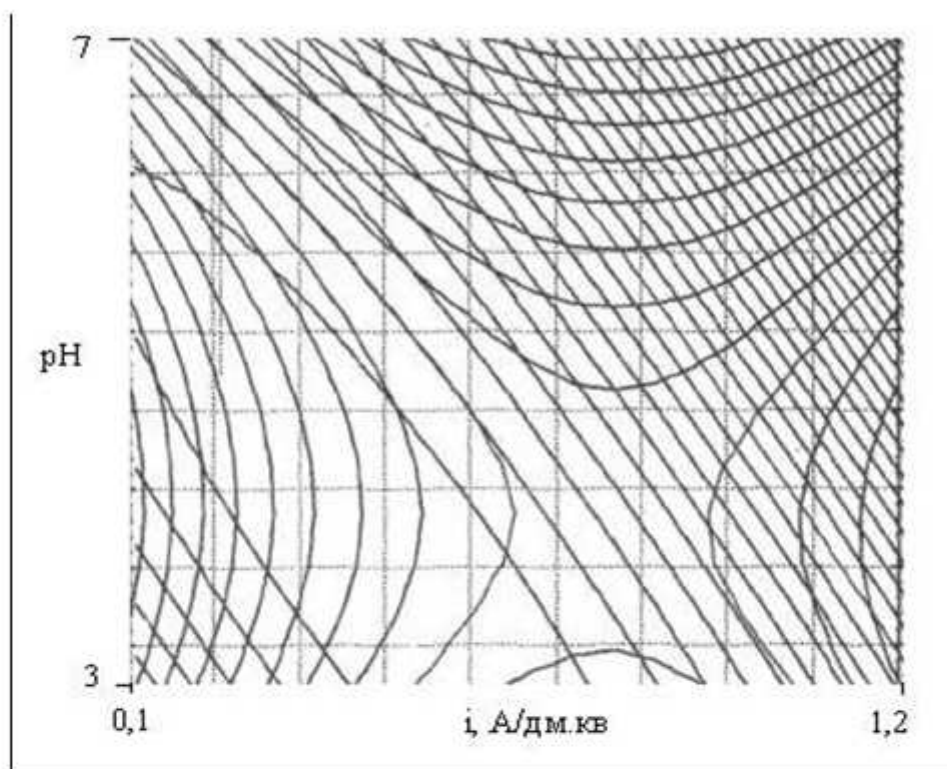
$$B - pH = 6,37, C_{\text{ВХ}} = 0,72 \text{ Г/Л};$$

$$B - pH = 6,37, V = 3,22 \text{ М/ГОД};$$

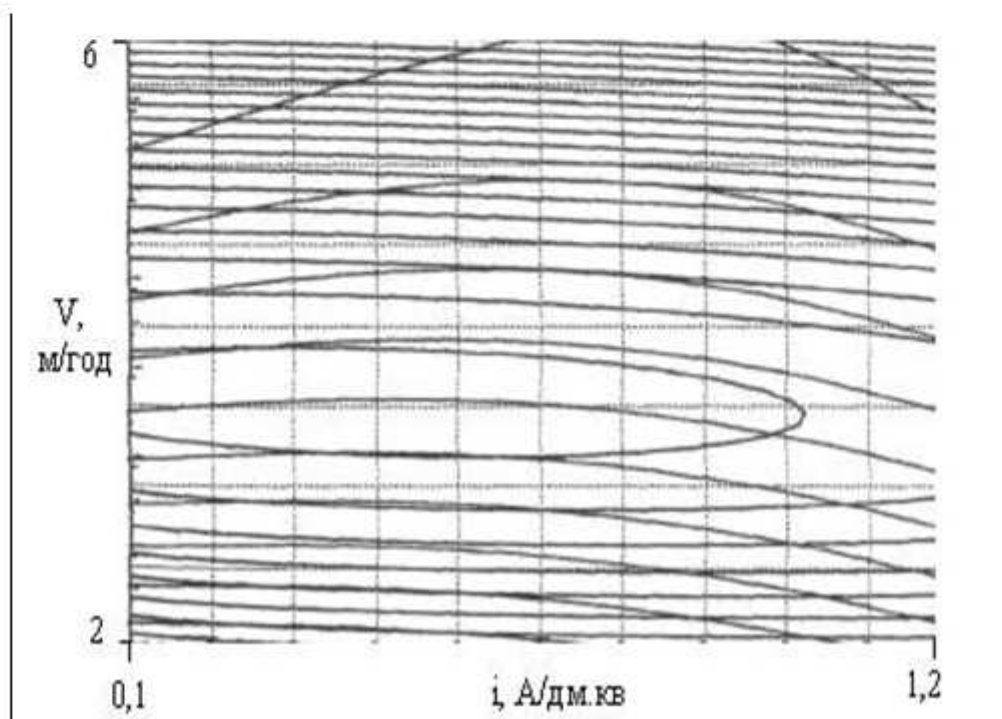
$$Г - I = 0,32 \text{ А/ДМ}^2, C_{\text{ВХ}} = 0,72 \text{ Г/Л};$$

$$Д - I = 0,32 \text{ А/ДМ}^2, V = 3,22 \text{ М/ГОД};$$

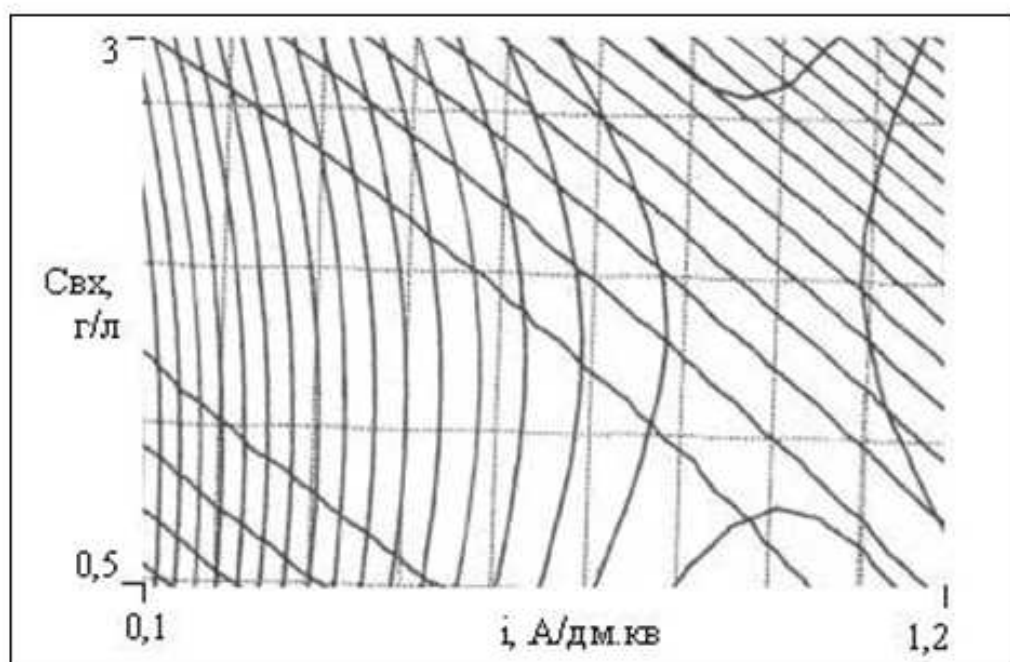
$$E - I = 0,32 \text{ А/ДМ}^2, pH = 6,37.$$



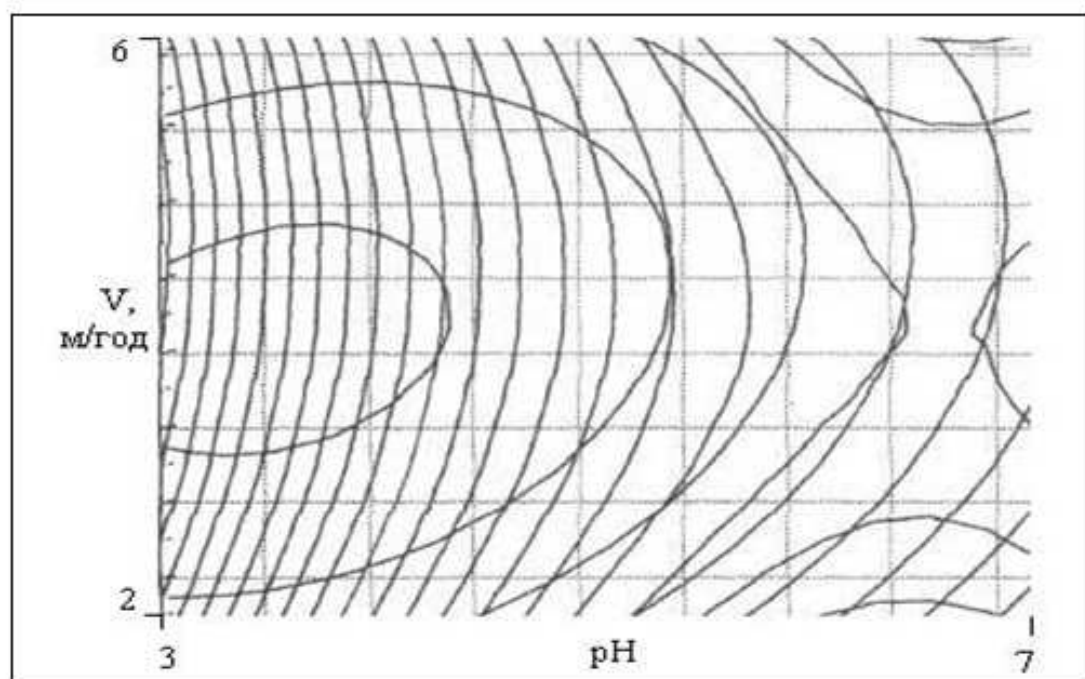
а



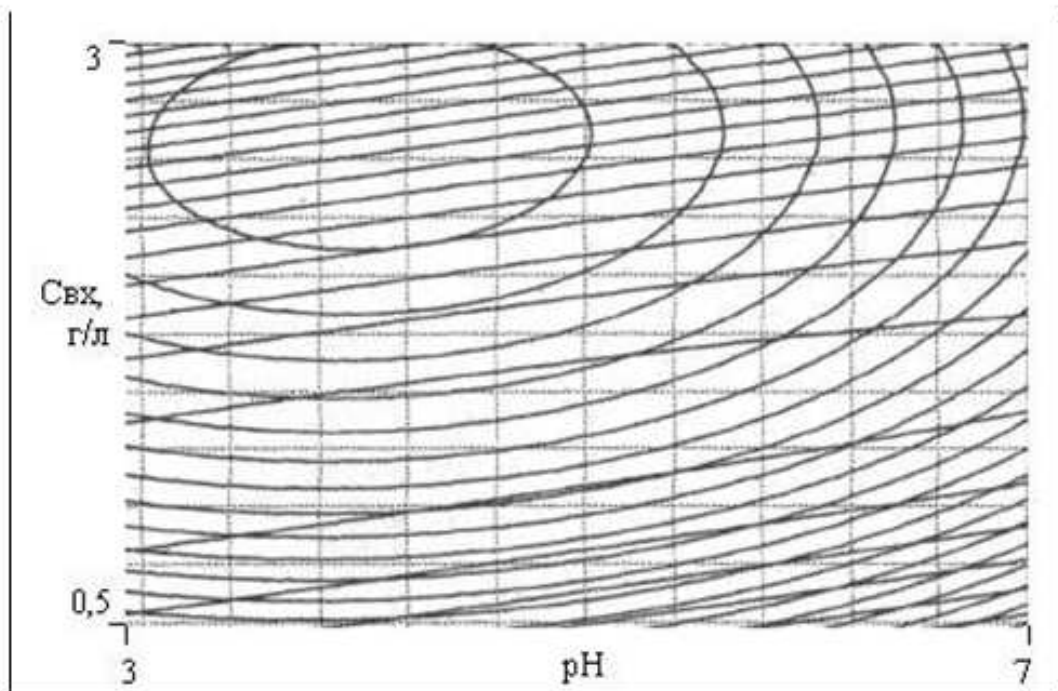
б



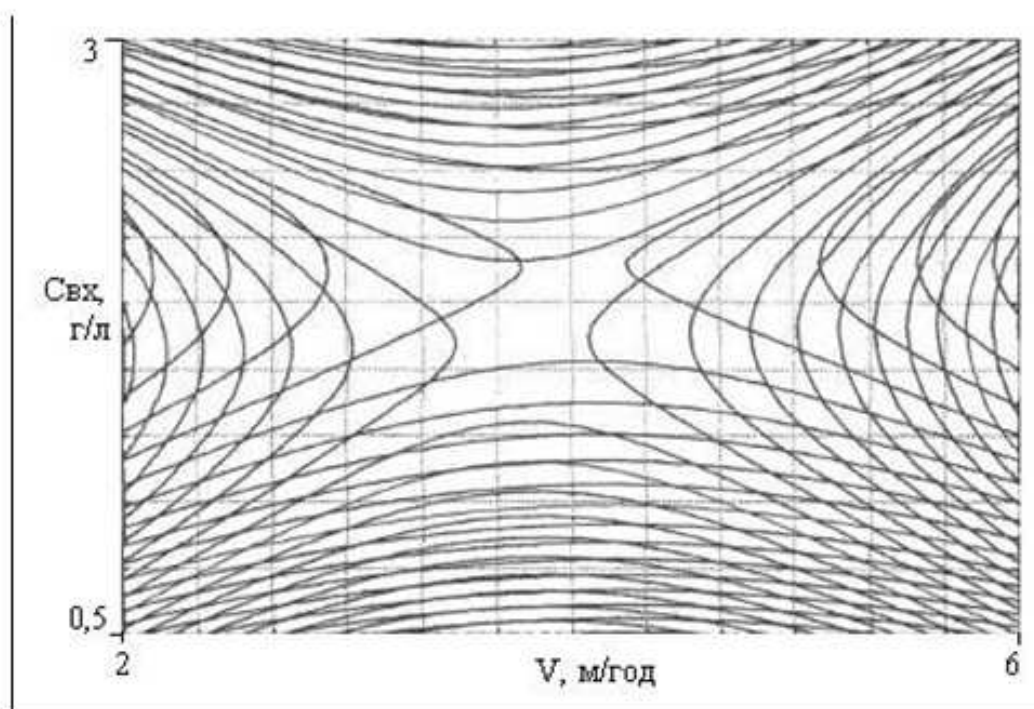
В



Г



д



е

Рисунок 2.5 – Двомірні перерізи якості очищення та енергетичних затрат при електричній коагуляції:

Таким чином можна зробити висновки, що під час електричної коагуляції стічних вод підприємства може бути присутня зміна оптимальних величин значень показників проходження цього технологічного процесу, яка є неконтрольованою, що в свою чергу, суттєво може ускладнити вирішення проблемної задачі для якісного очищення за умови мінімальних енергетичних витратах.

2.3. Висновки до розділу

2. Теоретично експериментально розрахунковим шляхом визначено, що енергетична ефективність електро-технологічного очищення стічних вод підприємства можлива за рахунок дотримання умов постійності (нестохастичності) вхідних параметрів в наступних межах: концентрація частинок, що зависли від 0,1 до 1,2 г/л; кислотність рН від 3 до 3,5; швидкість потоку води від 3 до 5 м/год; густина анодного струму i від 0,5 до 1 А/дм².

3. При виявленні взаємозв'язку параметрів та побудованих моделей регресії для електро-технологічного очищення стічних вод підприємства, було знайдено наступне: при зростанні густини анодного струму i в межах від 0,1 до 1,2 А/дм²), а також рН від 3 до 7 і лінійної швидкості потоку від 2 до 6 м/год - то якість очищення буде покращуватися від 5 до 60%, при цьому енергетичні витрати також будуть нелінійно збільшуватись в межах від 5 до 30%.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СНК ОЧИЩЕННЯМ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

3.1. Розробка математичної моделі електричного коагулятора

Баланс у вигляді рівняння, яке призначено для характеризувати зміни концентрації частинок, що зависли, за часом при русі речовини в стічних водах при початкових умовах: $\tau = 0$; $\frac{dC}{d\tau} = 0$; $C = C_0$ [37, 41, 42]:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{L}{V_k} (C_{ex} - C) - \omega_k \quad (3.1)$$

де: C – концентрація цільового компонента у розчині, г/м³;

C_{ex} – концентрація речовини на вході до електричного коагулятора, г/м³;

V – об'єм робочої зони електроагулятора, м³;

L – об'ємні витрати рідини, м³/с;

ω_k – зміна швидкості коагуляції, г/м³·с.

Мінус в правій частині формули 3.1 говорить про те, що зменшується кількість частинок, що зависли із стічної води.

Потім робимо порівняння швидкості зміни ентальпії стічних вод і різниці підходу/витрат теплоти на 1 часу:

$$Q_k = Q_E - (Q_{втр} + Q_{від}) \quad (3.2)$$

де: Q_k – теплота, виділена на підвищення температури середовища, Дж;

Q_E – кількість теплоти, виділеної при екзотермічній реакції, Дж;

$Q_{втр}$ – кількість теплоти, що передається в оточуюче середовище, Дж;

$Q_{від}$ – кількість теплоти, що відводиться з потоком очищеної води та коагулянту, Дж.

Для кожного параметра маємо:

$$Q_E = \omega \cdot V_k \cdot H \quad (3.3)$$

де: H – тепловий ефект процесу реакції електроагуляції), Дж/г·с·

$$Q_{emp} = k \cdot S(t - t_3) \quad (3.4)$$

де: k – коефіцієнт теплової відачі, Вт/м²·°С;

S – поверхня робочої зони площі апарату, м²;

t – температура рідини, °С;

t_3 – температура зовнішнього середовища, °С.

$$Q_{sid} = c \cdot \rho \cdot L(t - t_{ex}) \quad (3.5)$$

де: ρ – густина рідини, кг/м³;

c – питома теплоємність рідини, Дж/°С.

Тепер у формулу 3.2 підставляємо з виразів 3.3-3.5:

$$c \cdot \rho \cdot V_k \frac{dt}{d\tau} = \omega \cdot V_k \cdot H - k \cdot S(t - t_3) - c \cdot \rho \cdot L(t - t_{ex}) \quad (3.6)$$

початкові умови: $\tau = 0$; $\frac{dt}{d\tau} = 0$; $t = t_0$

Далі виконуємо перетворення та підстановку із заміною параметрів і в результаті отримуємо систему рівнянь для опису динаміки процесу електроагуляції:

$$\begin{cases} \frac{dC}{d\tau} = \frac{L}{V_k} (C_{ex} - C) - (a_0 + a_1 t + a_2 C + a_3 I) \\ T_2 \frac{dt}{d\tau} = \frac{(a_0 + a_1 t + a_2 C + a_3 I) \cdot V_k H}{KS} - (t - t_3) - \frac{c \rho L(t - t_{ex})}{KS} \end{cases} \quad (3.7)$$

початкові умови: $\tau = 0$; $dC/d\tau = 0$; $C = C_0$; $dt/d\tau = 0$; $t = t_0$, де: $T_2 = \frac{c \rho V_k}{KS}$ – стала

часу для розігріву.

Після чого було розкриття дужок, групування, заміни диференціальних рівнянь,

що дозволило отримати характеристичне рівняння:

$$A' \frac{d^2 C}{d\tau^2} - B' \frac{dC}{d\tau} + C' C = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{де: } A' = \frac{T_1 T_2}{D_1}; \quad B' = \frac{T_2 B_1}{D_1} - \frac{T_1 D_2}{D_1}; \quad C' = B_2 + \frac{D_2 B_1}{D_1}; \quad D' = -\frac{D_2 A_1}{D_1} - A_2.$$

а його корені:

$$\lambda_{1,2} = \frac{B' \pm \sqrt{(B')^2 - 4A'C'}}{2A'} \quad (3.9)$$

При цьому:

$$C'_1 = C_o - \frac{D'}{C'} - \left[\left(\frac{A_1}{T_1} - \frac{B_1 C_o}{T_1} - \frac{D_1 t_o}{T_1} + \frac{D' \lambda_1}{C'} - C_o \lambda_1 \right) \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] \quad (3.10)$$

$$C'_2 = \left(\frac{A_1}{T_1} - \frac{B_1 C_o}{T_1} - \frac{D_1 t_o}{T_1} + \frac{D' \lambda_1}{C'} - C_o \lambda_1 \right) \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.11)$$

$$C(\tau) = C'_1 e^{\lambda_1 \tau} + C'_2 e^{\lambda_2 \tau} + \frac{D'}{C'} \quad (3.12)$$

В [11, 19] наведені коефіцієнти лінійного рівняння регресії відповідно до обробки експериментальних даних та методів статистики імовірнісної математики, див. табл. 3.1.

Для отримання передаточної функції об'єкта керування електричного каогулятора було застосовано метод площин, шляхом апроксимації будь-якої перехідної функції $h(t)$ за певним ступенем точності.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти лінійного рівняння регресії 3.10 (для рівня ймовірності – 0,95, коефіцієнта множинної кореляції – 0,92, стандартному відхиленні оцінки – 1,23 мг/л, значимість визначалась за t-критерієм)

<i>Y</i>	<i>ω</i>	<i>0,772</i>
<i>x1</i>	<i>I</i>	<i>2,39</i>
<i>x2</i>	<i>C</i>	<i>0,72</i>
<i>x3</i>	<i>t</i>	<i>-0,002</i>

Після всіх необхідних перетворень передаточна функція має такий вигляд:

$$W(p) = \frac{K}{T_3 p^3 + T_2 p^2 + T_1 p + 1} \quad (3.13)$$

де: *T3*, *T2*, *T1* – сталі постійні часу;

K – коефіцієнт передаточної функції;

p – оператор Лапласа.

Як стверджують автори в [11, 15, 17, 19-22, 25, 27, 37, 38] взаємозв'язки між факторами електрокаогуляційної очистки стічних вод мають значну нелінійність. І рекомендують визначати залежність параметрів об'єкта коефіцієнтів передаточної функції від збурюючих факторів в технічному процесі. Якщо і при такому дослідженні не вдається виявити лінійну функцію, то можна сказати, що динамічні властивості електрокаогулятора непередбачувані та нелінійні.

Таким чином застосування традиційного підходу для побудови системи керування неможливо. Необхідно додатково синтезувати багато-функціональну підсистему коректировки коефіцієнтів передаточної функції об'єкта. Як показують дослідження вчених, то це складне завдання для практичної реалізації. І крім того, це може суттєво знизити гнучкість і адекватність роботи самої головної системи автоматичного керування.

3.2. Обґрунтування використання нейронних сіток та нечіткої логіки для побудови СНК очищенням стічних вод підприємств

Фазодисперсний стан речовин у воді може змінюватись через вплив кислотності рН, оскільки існує можливість впливу таких факторів [11, 19]:

- для створення належних умов взаємної дії води та інших речовин відбувається зміна стану валентності домішок;
- відповідно до термодинамічної діаграми Пурбе може бути зміна форми існуючих домішок у воді;
- можлива зміна побудови границі розділу фаз при агрегації домішок у воді;
- форма існуючих домішок може змінюватись шляхом їх взаємної дії з продуктами дісаціації води зі зміною рН;
- змінюється валентний стан хімічних сполук у воді, що можуть взаємно діяти разом з домішками, які вилучають з води.

Крім того значення рН у стічних водах промислових підприємств можуть спричинити наявність підвищення окисно-водного потенціалу, який спричиняють відновники (нітрити, органічні речовини, аміак), а також зменшення окислювання (хром, газоподібний хлор та ін.).

Таким чином передбачити значення рН стічних вод з урахуванням нестаціонарності – неможливо, і як наслідок, немає повного уявлення стосовно реакції її кінцевих продуктів. І також існує такий параметр, як інтенсивність очистки стічних вод, взаємодія домішок, присутніх в електроліті та зміна у часі характеристик електродів.

Ситуація ускладнюється тим, що [19, 37]:

- у системі «стічні води підприємства → електрокоагулятор» відбувається постійна нестаціонарна нелінійна зміна гідродинамічних параметрів;
- розроблено і ефективно функціонують в потоці у режимі реального часу лише ряд контрольно-вимірювальних приладів якості води (рН-метри, мутноміри, витратоміри, датчики температури та тиску);

- традиційна методика (наприклад, метод Лур'є) для якісного аналізу складу води потребує від кількох годин до кількох діб (залежно від досліджуваного параметру);

- всі вхідні величини перебувають у комплексному динамічному взаємозв'язку, часто створюючи неможливість прогнозування отриманих продуктів та шляхів реакцій.

В таких умовах доцільним є проведення синтезу адаптивної системи керування, яка повинна підлаштовувати технологічні параметри електрокоагулятора відповідно до змін вхідних параметрів.

Автоматична система керування повинна працювати не за традиційним кількісним принципом, коли вироблення керуючого впливу ув'язується з кількістю очищеної води та кількісними показниками вхідних величин, а за кількісно-якісним, оскільки у випадку електрокоагуляційної очистки стічних вод птахівничого комплексу відбувається неконтрольоване стохастичне коливання складу води і зміна структури взаємозв'язків між вхідними технологічними величинами. Фактично САК електрокоагулятором повинна керувати об'єктом типу «чорна скриня».

Сучасний світ автоматизації та інтелектуальних систем застосовує методи та засоби нечітких множин, нейронних сіток, нейрокомп'ютерів, генетичних алгоритмів тощо.

Штучні нейронні мережі призначені для моделювання роботи людського мозку з найпростішим визначенням, а будівельними блоками є нейрони [43].

Це дасть можливість забезпечити якість належного функціонування елетротехнічного обладнання, за рахунок само налаштування/адаптації (або переналаштування) параметрів роботи системи керування під час процесу електричної коагуляції в умовах відсутності всієї вхідної інформації [33]. Тобто пропонується створити систему нечіткого керування (СНК), яка буде мати в своєму складі нейронну мережу.

3.3. Висновки до розділу

1. Є недоцільним та складним завданням застосування традиційних систем з метою керування електричним коагулятором очистки стічних вод підприємства, враховуючі його динамічні властивості, як об'єкта керування.

2. Для якості та енергоефективності функціонування роботи електричного коагулятора очистки стічних вод промислового підприємства з урахуванням інерційності процесу електрокоагуляції, багатьох факторів та стохастичного характеру (нелінійна модель), було запропоновано використання нечіткого регулятора з нейронною мережею, що разом буде діяти як система нечіткого керування (СНК).

4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СНК ОЧИЩЕННЯМ СТИЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

4.1. Розробка нейронної нечіткої моделі. Навчання системи та налаштування параметрів

Для попереднього моделювання роботи СНК очищенням стічних вод підприємства доцільно використовувати засоби для моделювання систем в нечітких умовах, наприклад, систему нечіткого виводу ANFIS-Editor (Matlab), а саме Fuzzy Logic Toolbox [34]. Для нашої системи входними параметрами будуть:

- швидкість потоку;
- рН;
- вхідна концентрація завислих частинок;
- густина струму.

Пакет Matlab пропонує 3 блоки – це дозволяє уникнути ситуації виникнення ефекту «перенавчання» мережі. Було взято набори по 20 експериментальним даним: Training data-навчальні, Testing data-контрольні, Checking data-перевірятьні (рис.4.1). На початковому етапі створення нейро-моделі залежності якості очистки стічних вод від густини струму, кислотності, вхідної концентрації завислих частинок та швидкості потоку.

Під час навчання системи в блоці Training data проводилось 30 Epochs (цикли) адаптивного самоналаштування. Дотримувались не більше $3,98 \times 10^{-5}$ мг/л середньоквадратичної похибки.

Після чого запустили Testing data. Спочатку результати нам не підходили (середньоквадратична похибка становила близько 12,66 мг/л). Потім було проведено повторні цикли навчання. Результатом стали 64 спроби навчання при середньоквадратичному відхиленні 0,283 мг/л. Така якість прийнятна, показано на рис. 4.2.

Checking data дозволила перевірити якість роботи нейронної нечіткої мережі та впевнитись у відсутності наявності ефекту «перенавчання». Оскільки

середньоквадратична похибка не більше 0,349 мг/л, то можна зробити висновок що запропоновану систему «навчили», показано на рис. 4.3.

Training						Testing					
I, A/дм.кв	pH	V, м/год	C, г/л	C, мг/л	P, Вт	I, A/дм.кв	pH	V, м/год	C, г/л	C, мг/л	P, Вт
1,2	3	2	0,5	4,54	7,65	0,2	3,1	2,1	0,6	6,45	0,91
0,1	7	2	0,5	0,13	0,29	0,3	3,2	2,2	0,7	7,11	1,93
0,1	3	6	0,5	13,69	9,75	0,4	3,3	2,3	0,8	7,82	3,02
1,2	7	6	0,5	8,18	29,10	0,5	3,4	2,4	0,9	8,59	4,20
1,2	3	2	3	25,47	13,31	0,6	3,5	2,5	1	9,41	5,47
0,1	7	2	3	27,29	4,78	0,7	3,6	2,6	1,1	10,29	6,81
0,1	3	6	3	41,86	15,43	0,8	3,7	2,7	1,2	11,22	8,24
1,2	7	6	3	44,64	37,59	0,9	3,8	2,8	1,3	12,21	9,87
0,65	5	4	1,75	18,97	13,85	1	3,9	2,9	1,4	13,25	11,47
0,65	7	2	3	27,26	11,15	1,1	4	3	1,5	14,34	13,15
0,1	5	2	0,5	2,78	0,52	1,2	4,1	3,1	1,6	15,49	14,91
1,2	5	6	3	43,49	33,29	1,2	7	6	2,9	42,84	37,13
0,1	7	2	1,75	12,11	2,27	1,1	6,9	5,9	2,9	42,37	34,78
0,1	5	6	3	43,58	18,37	1	6,7	5,8	2,8	40,25	31,96
0,65	7	6	0,5	8,72	21,38	0,9	6,8	5,7	2,7	38,24	29,78
1,2	3	6	1,75	25,84	24,33	0,8	6,7	5,6	2,6	36,25	27,29
1,2	3	4	3	32,88	20,25	0,7	6,6	5,5	2,5	34,30	24,89
0,65	3	6	0,5	13,11	14,96	0,6	6,5	5,4	2,4	32,42	22,57
1	4	3	0,8	7,35	10,69	0,5	6,4	5,3	2,3	30,59	20,33
0,7	6	5	2	25,13	20,34	0,4	6,3	5,2	2,2	28,81	18,18

Checking					
I, A/дм.кв	pH	V, м/год	C, г/л	C, мг/л	P, Вт
0,2	7	2	1,75	12,12	3,26
0,3	6,9	2,1	3	27,52	7,33
0,4	6,8	2,2	1,74	12,59	5,99
0,5	6,7	2,3	2	15,81	7,94
0,6	6,6	2,4	1,73	13,06	8,77
0,7	6,5	2,5	1,78	13,91	10,31
0,8	6,4	2,6	1,72	13,53	11,60
0,9	6,3	2,7	1,79	14,69	13,22
1	6,2	2,8	1,71	14,08	14,49
1,1	6,1	2,9	1,8	15,39	16,06
1,2	6	3	1,7	14,55	17,29
1,2	5,9	3,1	1,81	16,16	17,87
1,1	5,8	3,2	1,69	15,20	16,61
1	5,7	3,3	1,82	17,08	16,04
0,9	5,6	3,4	1,68	15,90	14,78
0,8	5,5	3,5	1,83	18,00	14,28
0,7	5,6	3,6	2	20,32	14,03
0,6	5,4	3,7	1,84	18,88	12,68
0,1	5,3	3,8	3	33,73	10,26
0,2	5,2	3,9	1,85	19,86	8,96

Рисунок 4.1 – Експериментальні дані для навчання нейронної нечіткої моделі

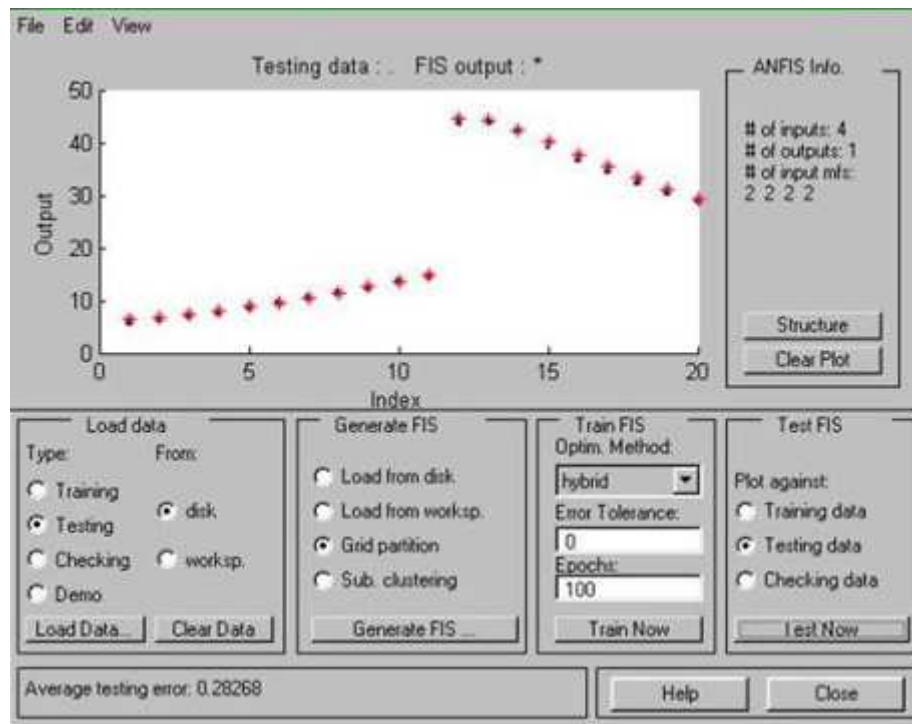


Рисунок 4.2 – Результати контрольної перевірки налаштування параметрів системи

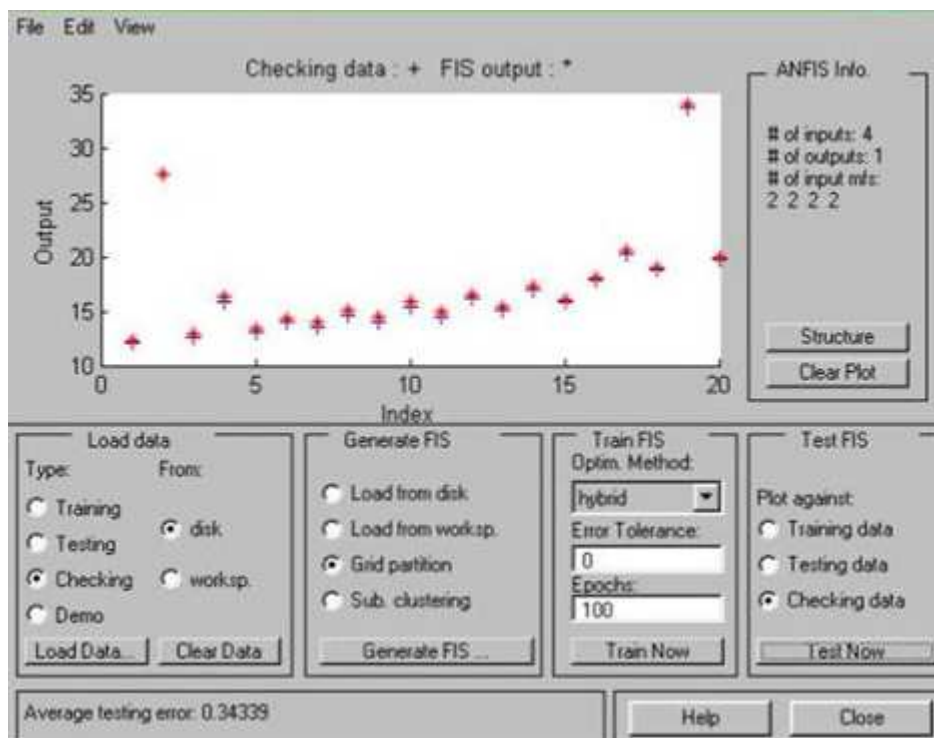


Рисунок 4.3 – Результати перевірки налаштованих параметрів системи

На рис. 4.4 показані залежності вхідних параметрів від концентрації частинок, що зависли, на виході електричного коагулятора. Таким чином було отримано вже налаштовану нечітку нейронну сітку. Ці залежності володіють чітким нелінійним характером та відповідають попереднім дослідженням по якості.

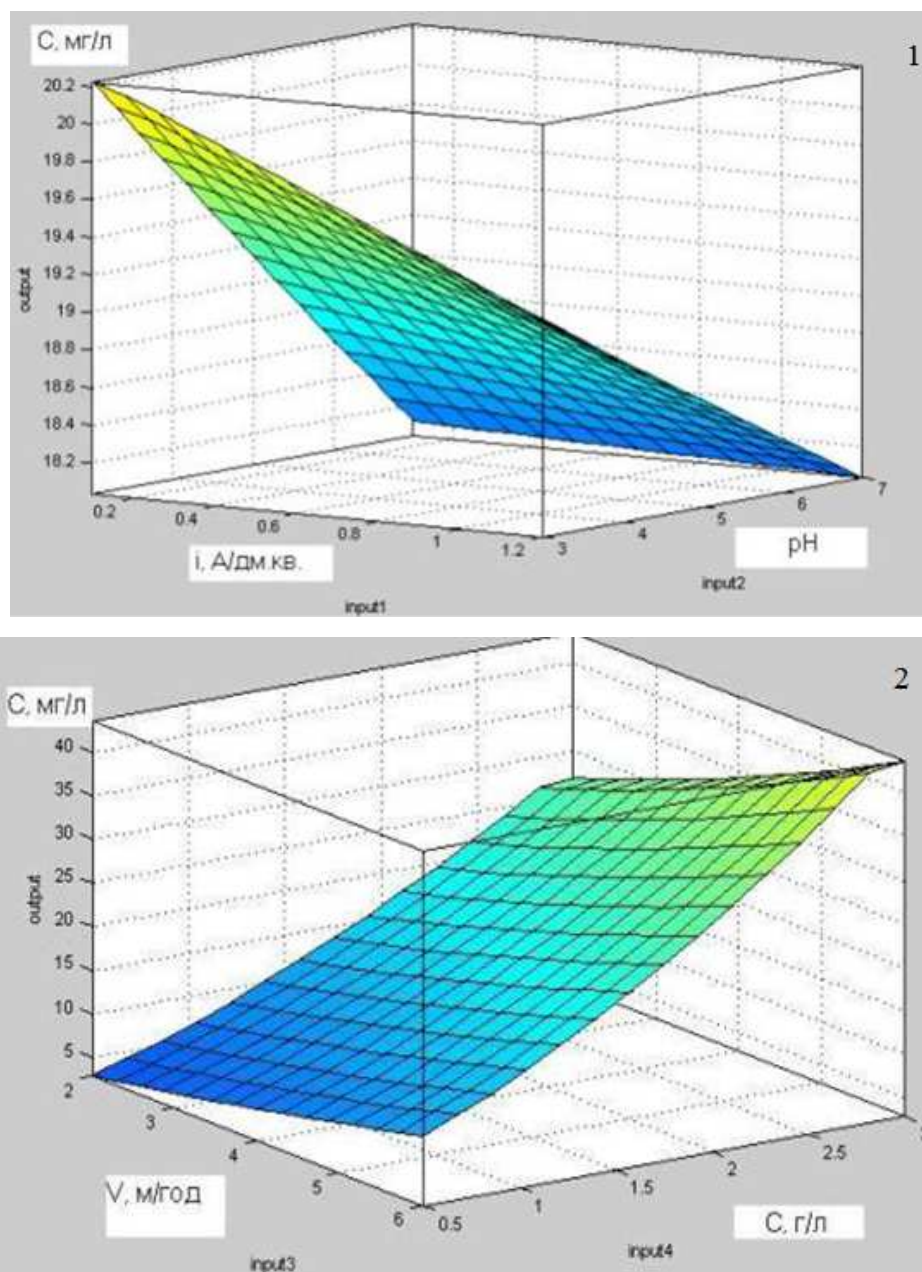


Рисунок 4.4 – Залежності налаштованих параметрів ситеми:

1 – густина струму та рН;

2 – лінійна швидкість потоку в просторі між електродами та вхідною концентрацією частинок завислих

Найменша концентрація буде при найбільших значеннях рН (6,5-7,5) й густини анодного струму (0,83-1,25 А/дм.кв.), а також при мінімальних значеннях швидкості потоку в просторі між електродами (2,2-3,3 м/год) та вхідній концентрації частинок що зависли (0,45-1,1 г/л).

Під час процесу роботи функціонування система генеруватиме керуючий вплив (після отримання наборів вхідних параметрів).

Критерієм енергетичної ефективності роботи системи керування електричним коагулятором буде [19, 37]:

$$EF = \frac{(C_{вих} - C_{зад}) \cdot Q}{W} = \frac{\Delta C \cdot Q}{W} \quad (4.1)$$

де: $C_{вих}$ – фактична вихідна концентрація завислих частинок, г/м³;

$C_{зад}$ – задана концентрація завислих частинок, г/м³;

ΔC – відхилення фактичного значення вихідної концентрації завислих частинок від встановленого (нормативного) значення, г/м³;

Q – витрати стічних вод, год.;

W – затрачена на електрокоагуляцію електроенергія, кВт·год.

Завданням автоматичного керування буде намагання максимально приблизити значення EF до 0.

За допомогою системи MatLAB Fuzzy Logic Toolbox- ANFIS Editor було змодельовано роботу алгоритму системи по такому критерію. Алгоритм наступний:

1. Задаємо вхідну концентрацію частинок завислих+(рН)+лінійну швидкість потоку в просторі між електродами;
2. Змінюємо поступово густину струму до значення вихідної концентрації частинок завислих до 15 мг/л (див. рис. 4.5);
3. Вводимо отриманий набір даних в одну з вибірок (навчальні, контрольні або перевіряльні);

4. Потім створюємо екологічно-безпечну енергетично ефективну автоматизовану систему електричної очистки (електричним коагулятором).

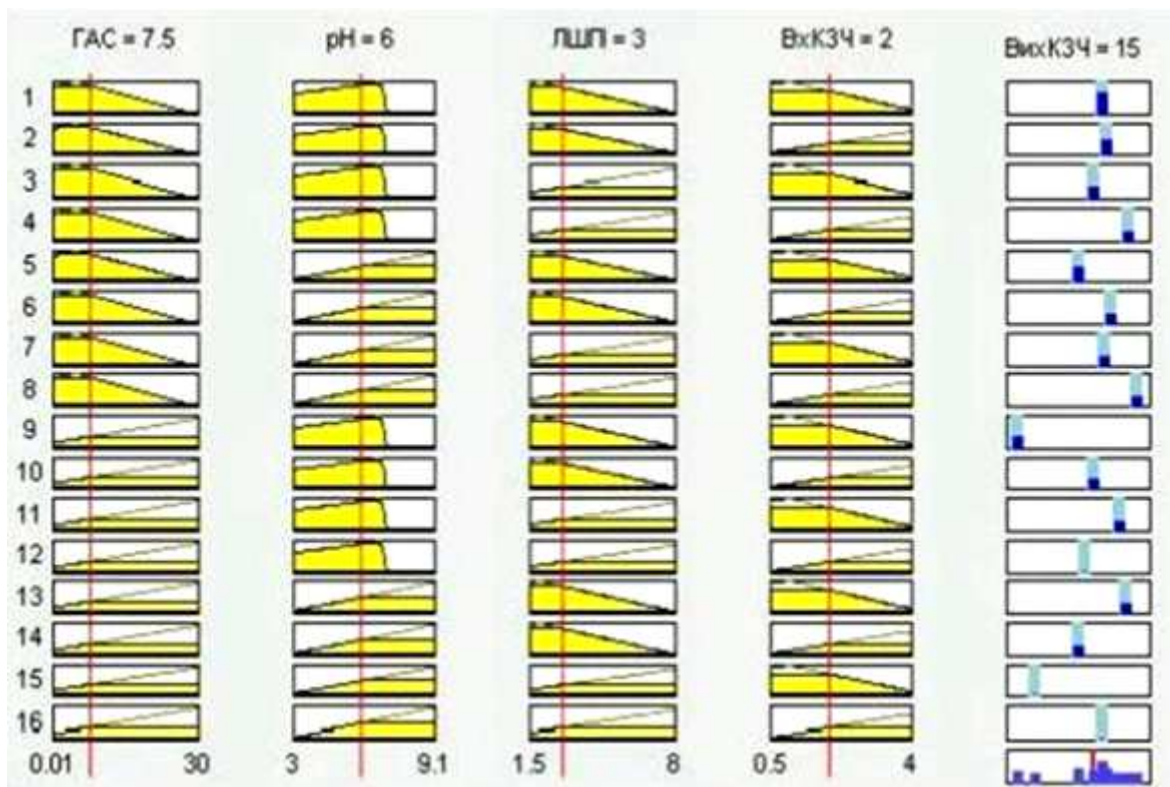


Рисунок 4.5 – Діалогове вікно “Rule” FIS-редактора середовища MatLAB:

ГАС – густина анодного струму; ЛШП – лінійна швидкість потоку;

ВхКЗЧ – вхідна концентрація завислих частинок;

ВихКЗЧ – вихідна концентрація завислих частинок.

4.2. Побудова функцій належності та результати моделювання

На вхід системи надходитимуть 3 величини таких параметрів (рис.4.6):

1. Кисотно-активна реакція вод стічних(pH);
2. Лінійна швидкість потоку в просторі між електродами;
3. Вхідна концентрація частинок завислих.

Керуючим впливом вихідної величини є - густина анодного струму.

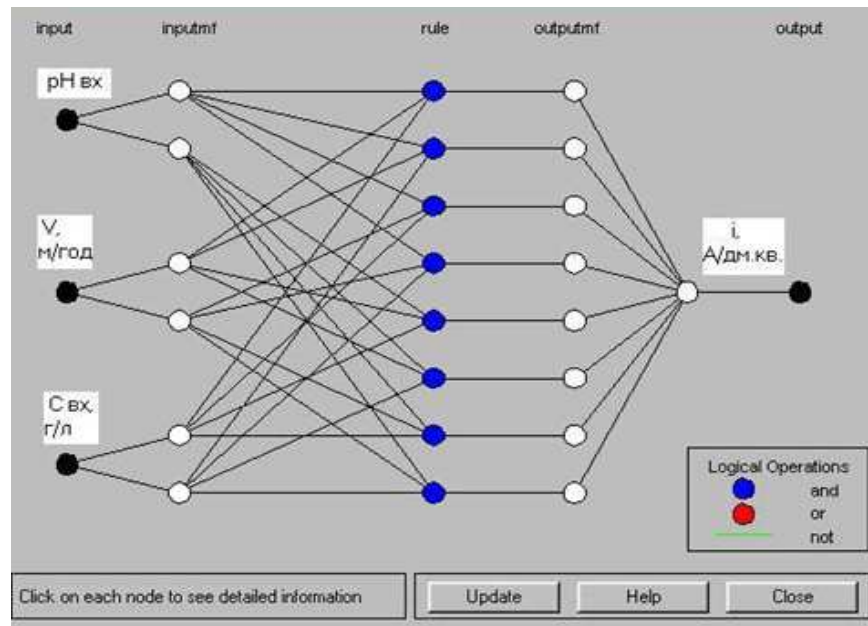


Рисунок 4.6 – Структура СНК в Matlab

Завантаживши налаштовані параметри в ANFIS було досліджено систему на самоналаштування. І в результаті ефекту «перенавчання» не було, що підтверджує рис. 4.7. При цьому при навчальній вибірці середньоквадратична похибка дорівнює 0,18 мг/л, кількість етапів епох навчання = 24; при контрольній вибірці СКВ=0,34 мг/л.

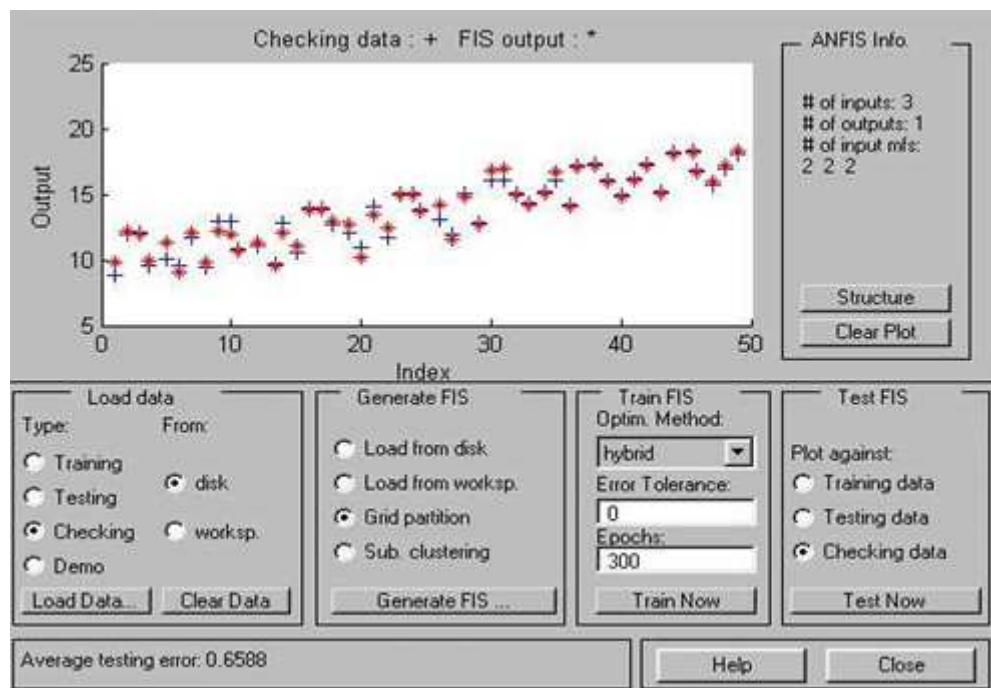


Рисунок 4.7 – Результати адаптивного налаштування СНК

Також можна додати ще 1 вхідний вхідний – з якою швидкістю змінюється концентрація частинок у стічних водах підприємства. Це дасть можливість підвищити в подальшому якість керування [19, 34, 37] (рис. 4.8).

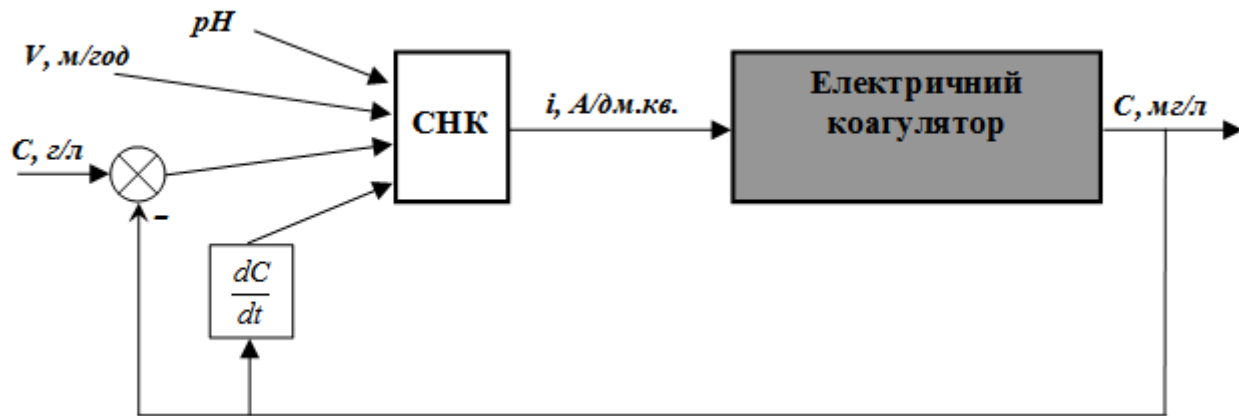


Рисунок 4.8 – Структурна схема автоматичної системи керування електро-коагуляційною очисткою стічних вод підприємства

З використанням методу зворотного розповсюдження помилки для було розроблено наступний алгоритм.

- 1) на вхід сітки надходить один з можливих образів пари вхідних і вихідних сигналів та режимів функціонування роботи сітки.
- 2) визначають фізично-реальне значення допоміжної змінної для вихідного слою-шару.
- 3) те саме виконується для нейронів інших слоїв-шарів по значенню допоміжної змінної.
- 4) коректування усіх вагів у нейронній сітці.
- 5) у разі якщо помилка мережі суттєва, то необхідно переходити до першого пункту 1. Таким чином виконується цей метод зворотного розповсюдження помилки.

В результаті було отримано 29 нечітких продукцій. В табл. 4.1 наведено позначення термів лінгвістичних змінних.

Таблиця 4.1. – Позначення лінгвістичних змінних термів змінних

<i>NB</i>	Negative Big	<i>Від'ємне велике</i>
<i>NM</i>	Negative Middle	<i>Від'ємне середнє</i>
<i>NS</i>	Negative Small	<i>Від'ємне мале</i>
<i>ZN</i>	Zero Negative	<i>Від'ємне близьке до нуля</i>
<i>Z</i>	Zero	<i>Нуль, близьке до нуля</i>
<i>ZP</i>	Zero Positive	<i>Додатне близьке до нуля</i>
<i>PS</i>	Positive Small	<i>Додатне мале</i>
<i>PM</i>	Positive Middle	<i>Додатне середнє</i>
<i>PB</i>	Positive Big	<i>Додатне велике</i>

Для генерації алгоритму було обрано алгоритм Суджено (Sugeno), як показано на рис. 4.9.

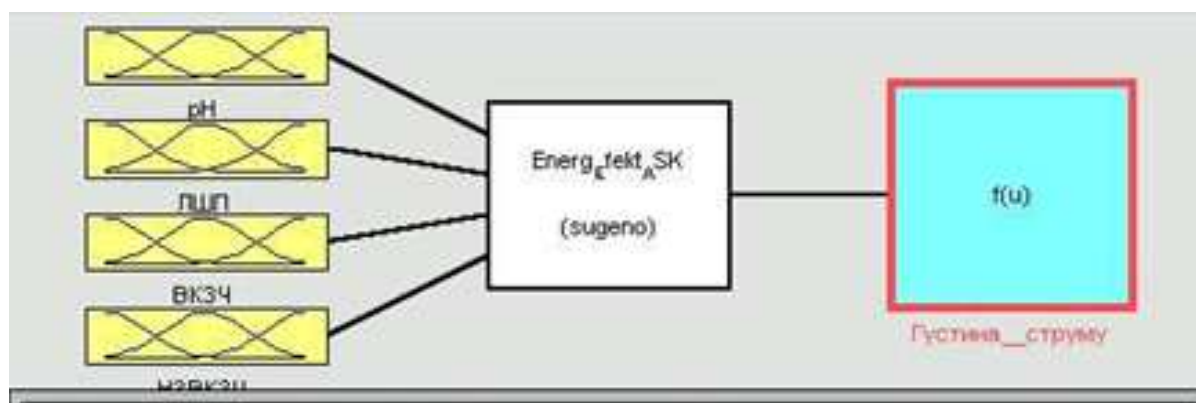


Рисунок 4.9 – Структура СНК очискою стічних вод підприємства у FIS-редакторі

Функції належності для термів вхідних змінних наведені на рис. 4.10.

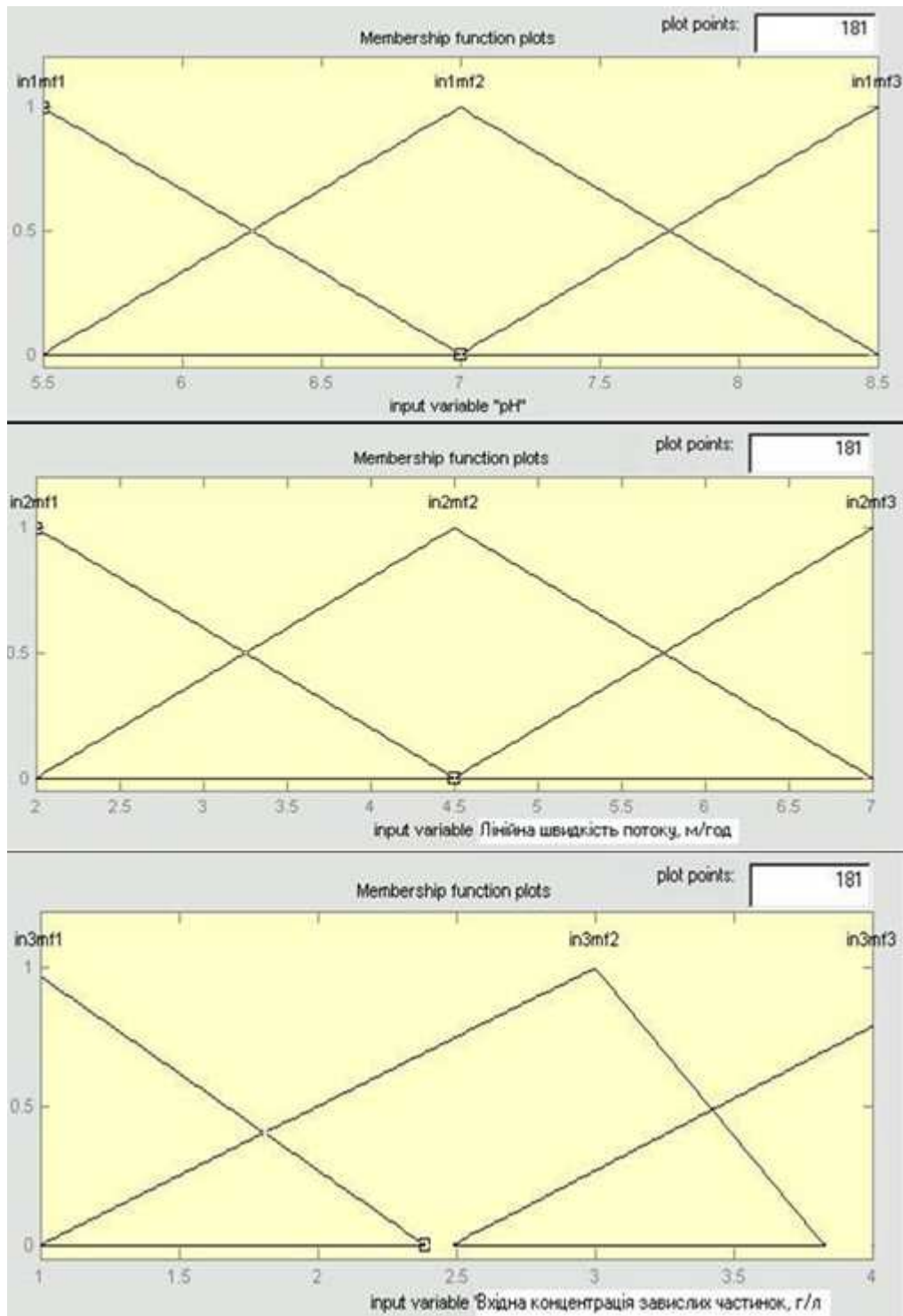


**Рисунок 4.10 – Функції належності термів змінних:
рН, швидкість потоку в просторі між електродами,
вхідна концентрація частинок завислих**

4.3. Перевірка адекватності розроблених моделей

В пакеті Simulink середовища MatLab було розроблено та побудовано модель для імітаційного моделювання роботи СНК очисткою стічних вод підприємства (рис. 4.11) [19, 37, 38].

Очищення виконується на основі моделі, побудованої в середовищі Matlab. Ця модель називається – електричний коагулятор. Його внутрішній вигляд показаний на рис. 4.12.

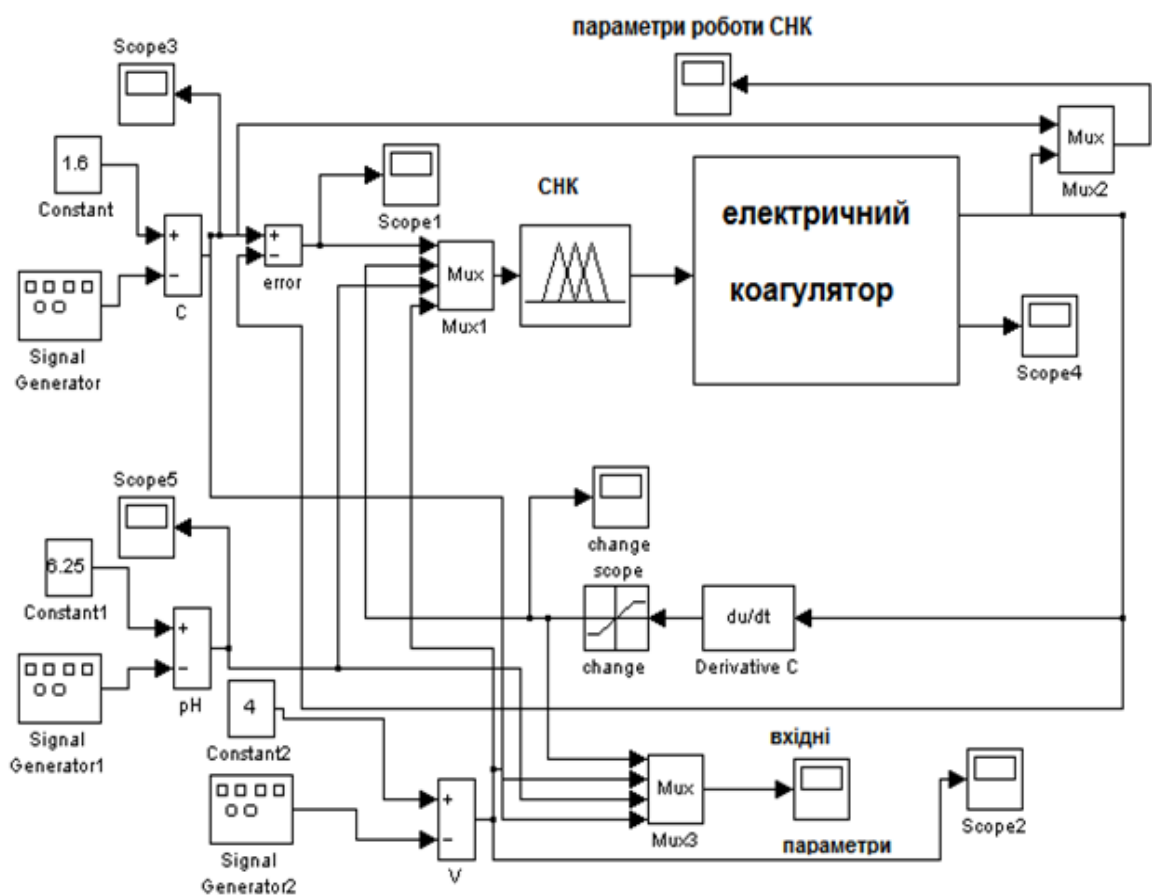


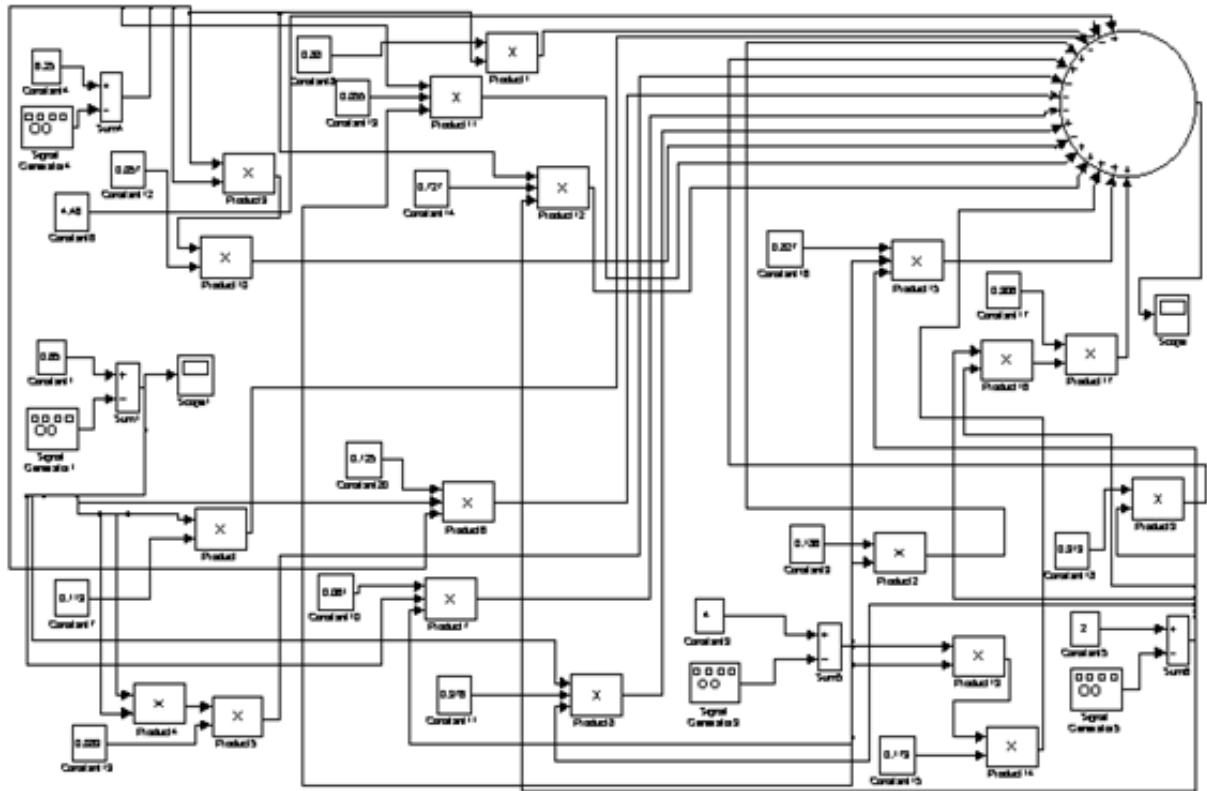
Рисунок 4.11 – Моделювання роботи СНК очищенням стічних вод підприємства

Призначення елементів моделі [19, 223, 32, 34, 37, 38]:

Signal generator представлення форми хвилі для вихідної змінної;

du/dt – похідна параметра C ;

change – необхідно з метою обмеження на верхніх/нижніх значеннях насичення вхідного сигналу.



Діапазони зміни вхідних параметрів:

- від 5,5 до 7 для рН;
- від 0,5 до 3 г/л для концентрації завислих частинок;
- від 2 до 6 м/год для лінійної швидкості потоку у просторі між тродами.

Ступинчасто змінювались усі вхідні параметри зразу. І при випадковій зміні параметрів (амплітуда вхідних значень) система також працювала ефективно, як показано на рис. 4.13.

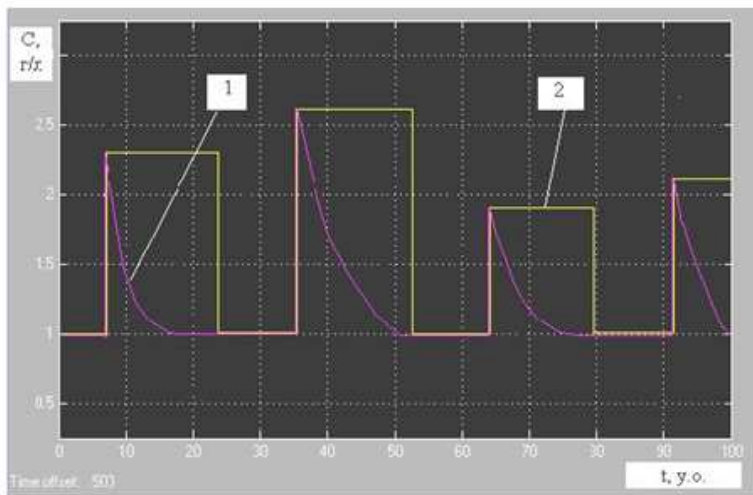


Рисунок 4.13 – Графік якості роботи СНК з електричним коагулятором:

1 – концентрація частинок завислих з виходу електричного коагулятора;

2 – їх вхідна концентрації

З вигляду даного графіка можна зробити висновок, що система працює ефективно та має такі властивості:

- майже відсутнє перерегулювання – не більше 2%;
- відсутні полу коливання (0);
- суттєва швидкодія – близько 0,5-1 с;
- динамічне відхилення не перевищує 1,5-1,6 г/л.

4.4. Висновки до розділу

1. Всі розроблені моделі підтвердили свою адекватність. При цьому СКВ при настройці СНК становить не більше 0,34339 мг/л без ефекту «перенавчання».

2. Дослідження шляхом моделювання якості роботи СНК з електричним коагулятором (швидкодія – 0,5-1 с (залежно від комбінації вхідних параметрів), перерегулювання – біля 2%, максимальне динамічне відхилення – 1,5-1,6 г/л, кількість напівколивань – 0) показали її відповідність технологічним вимогам (забезпечення заданої вихідної концентрації завислих частинок).

5. АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СНК ОЧИЩЕННЯМ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

5.1. Схемотехнічна реалізація

На рис. 5.1 показано удосконалену схему з попереднього розділу. Для цього в систему було додано електрокоагулятор, що містить в своєму складі електроди, як правило, зі сталі. Таке удосконалення дозволить підвищити ресурсозбереження.

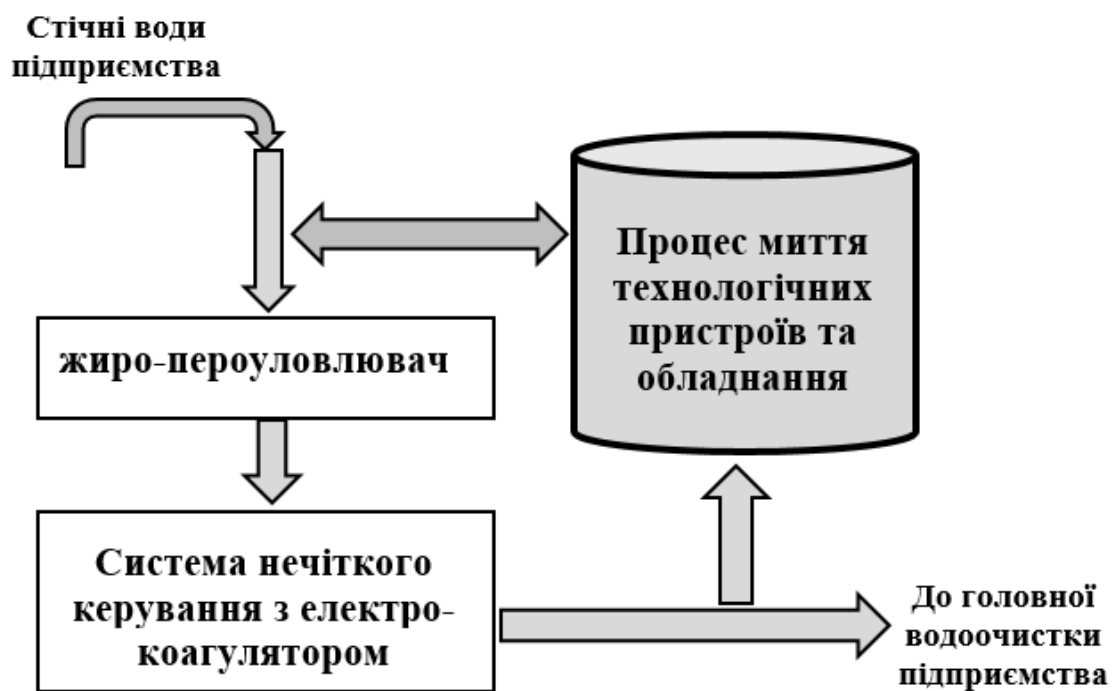


Рисунок 5.1 – Структура замкненої системи водопостачання

Нейро-інформаційна система нечіткого керування (СНК) виконує керування очищенням води за допомогою електрокоагулятора, і водночас - це вузол для даної системи очищення стічних вод в цеху переробному.

Основні технологічні параметри, які наведені в табл. 5.1, для установки електрокоагулятора було взято з довідникових даних, а обробка даних робилась відповідно до методики [19, 37].

Таблиця 5.1 – Основні технічні характеристики установки електрокоагулятора

Найменування параметру	Величина
Товщина електродів, p_e	8 мм
Густина струму	100 А/м ²
Відстань між електродами, l_e	15 мм
Кількість електродів	10 шт
Витрати струму D_t	300 Кл/л
Ширина камери реактора, L_k	150 мм
Матеріал електродів	Сталь 3
Робоча поверхня електродів, f_e	10 м ²

При розрахунку вхідними величинами є густина та витрати струму на електродах, а також витрати вод стічних. В табл. 5.2 зазначено параметри, що впливають на якість стічних вод після роботи підприємства.

Таблиця 5.2 – Інтервали зміни параметрів по якості стічних вод при роботі підприємства

Показник	Значення
Завислі частинки, мг/л	1800-2000
pH	6,4-7,1
ОВП, мВ	780-810
БПК ₅ , O ₂ /л	140-160

Згідно методики, брали проби щогодини, потім рахували середнє значення за добу.

Рекомендовано здійснювати попередню обробку та очистку (так як якщо цього не робити, то треба буде досить часто змінювати завантаження фільтру, а це не вигідно, як технічно, так і економічно). Для попередньої очистки доцільно застосувати схему, запропоновану в [19, 37], яка показана на рис. 5.2. В дану схему було внесено зміни та додано СНК.



Рисунок 5.2 – Структурна схема для замкненого водопостачання підприємства з використанням СНК:

ПР – пункт розподілення; АСК – автоматична система керування

Для багато-канального давача рівня рідини підключення до приладу збору інформації та сигналів слід використовувати схему, наведену на рис. 5.3. Алгоритм роботи даного давача наступний, згідно структурної схеми (рис. 5.4).

Всі давачі (4 одиниці) розміщені послідовно на підкладці. Ємність «сухих» давачів в повітрі має бути однаковою так само, як і ємність здавачів, що поклали у

рідину. У випадку якщо рівень рідини посередині діапазону вимірювання нижнього давача (4) (чи на границі між значеннями давачів (3) (4), то тоді ємність на верхніх давачах (1)-(3) слід бути однаковою. Коли знаходиться в інтервалі вимірювання 3 давача тоді ємність для пари 1 та 2 має бути однаковою.

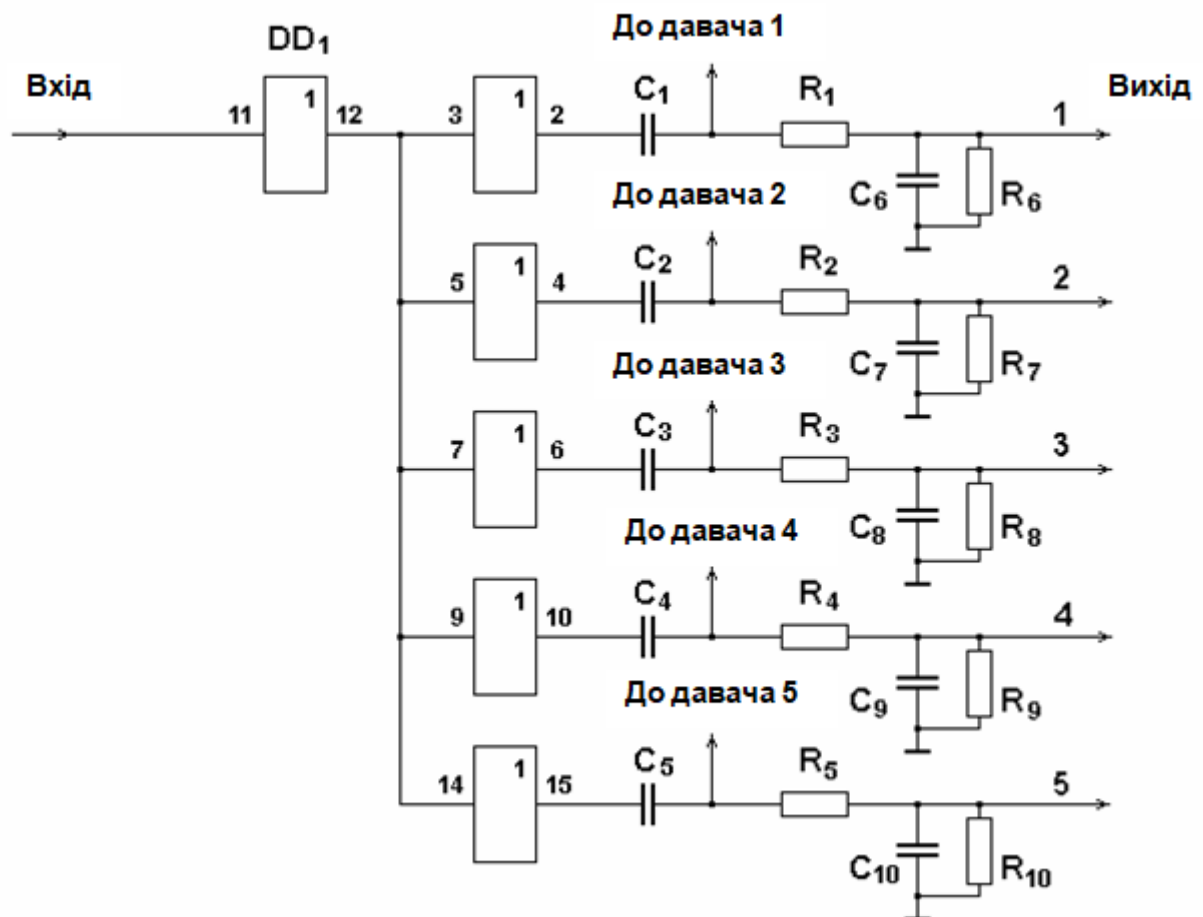


Рисунок 5.3 – Принцип під'єднання багато-канального давача рівня рідини до пристрою збору інформації та сигналів

Схема електрична принципова

Рівень рідини на межі 3-го й 2-го давачів, то тоді пари 4 й 3, 2 й 1. Коли рівень рідини в діапазоні давача 2, то мати однакові параметри треба щоб мали давачі 4 й 3.

При використанні такого алгоритму можна знайти пари датчиків у яких однакові показники ємності. Слід врахувати щодо зменшення геометричної

висоти давачів, а також щодо збільшення їх кількості на підкладці. Це може дозволити утворити певну шкалу, у якій точність вимірювання буде не більша чим висота 1-го елемента, тобто давача.

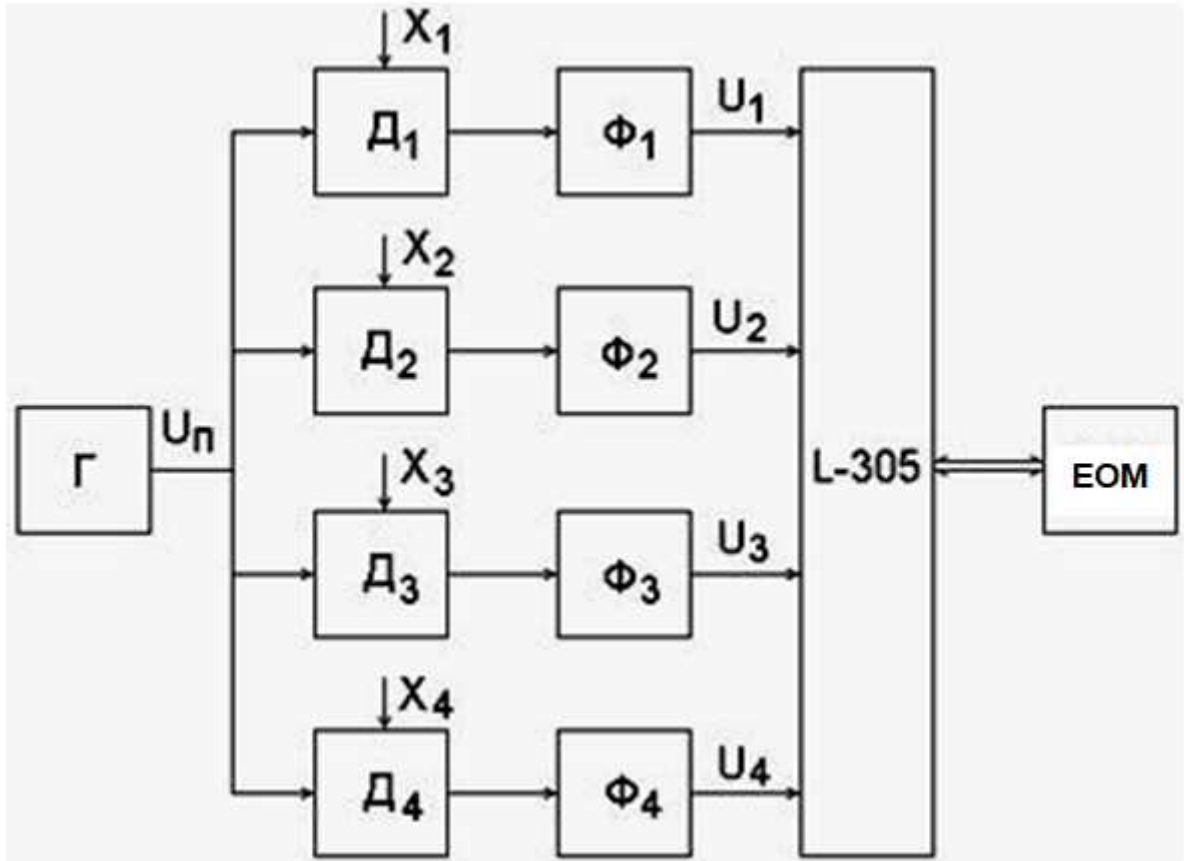


Рисунок 5.4 – Обладнання для сполучення багато-канального давача:

Г – генератор; Д1...Д4 – фільтри; Ф1...Ф4 – фільтри

Схема електрична структурна

5.2. Програмна реалізація СНК

При апаратній реалізації СНК електричним коагулятором використано такі елементи для:

- концентрації вхідної у завислих частинках;
- швидкості потіку стічних вод;
- активній реакції (рН) вод стічних.

З цією метою слід обрати наступні пристрої: ультразвуковий для вимірювання концентрації завислих частинок; промисловий рН-трансміттер для сприймання сигналу безпосередньо з рН-електроду; промисловий стаціонарний пристрій для вимірювання витрат й швидкості потоку рідини; керуючий пристрій – мікроконтролер, що підтримує середовище розробки IsaGraf [19, 37] та можна застосувати мову програмування FCL [19, 34]. Цю мову розроблено для нечітких моделей в системах керування на PLC – Programmable Logic Controllers з виглядом структурованого тексту. Можна для програми використати алгоритм Сужено.

Вхідні змінні та їх значення (швидкість потоку у міжелектродному просторі, рН, вхідна концентрація завислих частинок) можуть поступати зі сприймаючих елементів у функціональний блок діаграм FBD/LD. Керуючий вплив – це густина анодного струму визначається за допомогою виконання певної програми на мові ST. Задане значення керуючого впливу через модуль мікроконтролера та блок гальванічного розподілення поступають на електричний електрокоагулятор. Приклад лістингу такої програмної реалізації наведений в додатку А.

5.3. Висновки до розділу

2. Застосування «розумних» інтелектуальних сучасних засобів автоматизації та програмного забезпечення для реалізації СНК може дати змогу розробити адаптивно-гнучку апаратно-програмну реалізацію систем очистки вод промислових підприємств.

3. Для апаратно-програмної реалізації СНК очищення та фільтрації стічних вод підприємства за допомогою електричного коагулятора доцільно застосувати мікроконтролера або ПК зі стандартом підтримки IEC 1131-7.

4. Сприймаючі та керуючі елементи для такої системи мають бути з електричними виходами класу точності – не менше 1,5.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі отримано такі результати:

1. Параметри з якості стічних вод промислових підприємств не відповідають встановленим нормам, а існуючі засоби та системи розроблені для стаціонарних систем. Тому запропоновано застосування адаптивних методів для очищення стічних вод промислового підприємства.
2. Теоретико-експериментально розрахунковим шляхом визначено, що енергетична ефективність електро-технологічного очищення стічних вод підприємства можлива за рахунок дотримання умов постійності (нестохастичності) вхідних параметрів в наступних межах: концентрація частинок, що зависли від 0,1 до 1,2 г/л; кислотність рН від 3 до 3,5; швидкість потоку води від 3 до 5 м/год; густина анодного струму i від 0,5 до 1 А/дм².
3. При виявленні взаємозв'язку параметрів та побудованих моделей регресії для електро-технологічного очищення стічних вод підприємства, було знайдено наступне: при зростанні густини анодного струму i в межах від 0,1 до 1,2 А/дм²), а також рН від 3 до 7 і лінійної швидкості потоку від 2 до 6 м/год - то якість очищення буде покращуватися від 5 до 60%, при цьому енергетичні витрати також будуть нелінійно збільшуватись в межах від 5 до 30%.
4. Застосування традиційних систем з метою керування електричним коагулятором очистки стічних вод підприємства є недоцільним та складним завданням, враховуючі його динамічні властивості, як об'єкта керування.
5. Для якості та енергоефективності функціонування роботи електричного коагулятора очистки стічних вод промислового підприємства з урахуванням інерційності процесу електрокоагуляції, багатьох факторів та стохастичного характеру (нелінійна модель), було запропоновано використання нечіткого регулятора з нейронною мережею, що разом буде діяти як система нечіткого керування.

6. Всі розроблені моделі підтвердили свою адекватність. При цьому середньо-квадратичне відхилення при настройці системи нечіткого керування становить не більше 0,34339 мг/л без ефекту «перенавчання».

7. Встановлено що система нечіткого керування повинна мати швидкодію 0,5-1 с, перерегулювання не більше 2%, максимальне динамічне відхилення 1,5-1,6 г/л, кількість напівколивань ставити 0.

8. Застосування «розумних» інтелектуальних сучасних засобів автоматизації та програмного забезпечення для реалізації СНК може дати змогу розробити адаптивно-гнучку апаратно-програмну реалізацію систем очистки вод промислових підприємств.

9. Для апаратно-програмної реалізації системи нечіткого керування очищення та фільтрації стічних вод підприємства за допомогою електричного коагулятора доцільно застосувати мікроконтролера або персонального комп'ютера зі стандартом підтримки IEC 1131-7.

10. Сприймаючі та керуючі елементи для такої системи мають бути з електричними виходами класу точності – не менше 1,5.

11. Для виконання заземлення необхідно 51 горизонтальний заземлювач на відстані 5 метрів та від поверхні ґрунту не менше 5 м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Запольський А. Фізико-хімічні технології очищення стічних вод. Київ : Вища шк., 2005. 671 с.
2. Кульський Л. Теоретичні основи та технології кондиціонування води. Київ : Наук. думка, 1980. 565 с.
3. Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення : Наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України від 01.12.2017 № 316 : станом на 23 лют. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text> (дата звернення: 31.10.2024).
4. Прийнято Закон. *Офіційний портал Верховної Ради України*. URL: <https://www.rada.gov.ua/news/Novyny/219438.html> (дата звернення: 31.10.2024).
5. Про затвердження Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами : Постанова Каб. Міністрів України від 25.03.1999 № 465 : станом на 30 жовт. 2013 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-п#Text> (дата звернення: 31.10.2024).
6. Кульський Л. Очистка води електрокоагуляцією. Київ : Будівельник, 1978. 112 с.
7. Филипчук В.Л. Очищення багатокomпонентних металомісткуючих стічних вод промислових підприємств – Рівне: УДУВГП , 2004 – 232 с.
8. Про затвердження Методичних рекомендацій з розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти із зворотними водами. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text> (дата звернення: 31.10.2024).
9. Довідник властивостей, методів аналізу та очистки води : довідник / ред. Л. Кульський. Київ : Наук. думка, 1980. 680 с.

10. Водний кодекс України : Кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР : станом на 19 квіт. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text> (дата звернення: 31.10.2024).

11. Лисенко В., Штепа В. Передумови створення автоматичної системи керування електролізними процесами очистки стічних вод промислових птахівничих комплексів з використанням нейроінформаційних технологій. *Аграрна наука і освіта*. 2006. Т. 7, № 1-2. С. 99–104.

12. Назарян М., Єфімов В. Електрокоагулятори для очистки промислових стоків. Харків : Вища шк., 1983. 144 с.

13. Боголюбов Н. Автоматизація керування технологічними процесами обробки води. Київ : Наук. думка, 1987. 204 с.

14. Bhargava D. A. Physico-Chemical Waste Water Treatment Technologies: An Overview. *International Journal Of Scientific Research And Education*. 2016. URL: <https://doi.org/10.18535/ijrsre/v4i05.05> (date of access: 31.10.2024).

15. Physicochemical methods for process wastewater treatment: powerful tools for circular economy in the chemical industry / A. J. Tóth et al. *Reviews in Chemical Engineering*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1515/revce-2021-0094> (date of access: 31.10.2024).

16. Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals / T. A. Kurniawan et al. *Chemical Engineering Journal*. 2006. Vol. 118, no. 1-2. P. 83–98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015> (date of access: 31.10.2024).

17. Штепа В. М. Розробка методики створення технологічних регламентів комбінованих систем очищення стічних вод промислових об'єктів / В. М. Штепа, Р. Є. Кот // *Енергетика і автоматика*. - 2017. - № 2. - С. 89-99. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia_2017_2_10.

18. Хоружий П.Д. Довідник по сільськогосподарському водопостачанню – К.: Вища школа, 1992 – 296 с.

19. Штепа В. М. Енергоефективні режими електротехнологічної очистки стічних вод птахівничого комплексу : дис... канд. техн. наук: 05.09.03. Київ, 2008. 239 с.

20. Saleh Ali Khalifa Tweib. PHYSICOCHEMICAL CHANGES IN MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT. *The International Journal of Engineering & Information Technology (IJEIT)*. 2024. Vol. 5, no. 1. URL: <https://doi.org/10.36602/ijeit.v5i1.335> (date of access: 31.10.2024).

21. Донченко М., Лисенко В., Штепа В. Електрохімічна поведінка електродів у водогінній воді та модельному розчині стічних вод птахівничого комплексу. *Електрифікація та автоматизація сільського господарства*. 2006. № 2(17). С. 26–36.

22. Dari H. W., Suhartini S. Dampak Pengolahan Air Lindi terhadap Kualitas Air Sungai dan Sumur di Sekitar TPA Regional Piyungan Yogyakarta. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*. 2024. Vol. 12, no. 1. P. 71. URL: <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i1.9601> (date of access: 31.10.2024).

23. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник / П. І. Бідюк та ін. Київ : «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», 2022. 610 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48418/1/Systemy_i_metody_pidtrymky_pryiniattia_rishen.pdf

24. Muloiwa M., Dinka M., Nyende-Byakika S. Modelling and optimizing hydraulic retention time in the biological aeration unit: Application of artificial neural network and particle swarm optimization. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.03.005> (date of access: 31.10.2024).

25. Донченко М., Лисенко В., Штепа В. Вплив технологічних параметрів електрохімічної очистки стічних вод птахофабрики на процес розчинення сталевих електродів при низьких значеннях мінералізації // *Електротехніка і механіка* - Київ: НАУ: - 2006. – № 1. – С. 153-155.

26. Physico-chemical Water Treatment Processes | IWA Publishing. *International Water Association Publications* | IWA Publishing. URL: [https://www.iwapublishing.com/news/physico-chemical-water-treatment-processes#:~:text=Physico-chemical%20treatment%20of%20wastewater,\(called%20coagulants%20and%20flocculants\).](https://www.iwapublishing.com/news/physico-chemical-water-treatment-processes#:~:text=Physico-chemical%20treatment%20of%20wastewater,(called%20coagulants%20and%20flocculants).) (date of access: 31.10.2024).

27. Штепа В. М. Концепція вдосконалення нормативної бази проектування систем водоочистки шляхом урахування дії нештатних ситуацій / В. М. Штепа // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2017. - Вип. 268. - С. 43-55. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2017_268_8.

28. Мартиненко І.І., Лисенко В.П. та інші – Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства – К.: Вища школа, 1999 р. – 201 с.

29. Анісімов А.В. Інформаційні системи та бази даних: Навчальний посібник для студентів факультету комп'ютерних наук та кібернетики. / Анісімов А.В., Кулябко П.П. – Київ. – 2017. – 110 с.

30. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів [Текст] : монографія / А.П. Ладанюк, О.А. Ладанюк, Р.О. Бойко, В.В. Івашук, Д.О. Кроніковський, Д.А. Шумигай. – К.: Інтер Логістик Україна, 2015. – 408 с.

31. Кривий, С. Л. (2007). Дискретна математика. Києво-Могилянська академія.

32. Архангельський В. І. Нейроні мережі в системах автоматизації / В. І. Архангельський, І. Н. Богаєнко, Г. Г. Грабовський, Н. А. Рюмшин – К.: Техніка, 1999. – 364 с.

33. Ладанюк А.П., Заєць Н.А., Луцька Н.М. Застосування адаптивних систем керування для нестационарних об'єктів технологічних комплексів неперервного типу // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы - Херсон: ХГТУ – 2005. - № 1. – С. 158-163.

34. Калюжний О.Я. Моделювання систем передачі сигналів в обчислювальному середовищі MATLAB-Simulink: Навч. Посібник. –К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. - 136 с

35. Воронін А. М. Інформаційні системи прийняття рішень: навчальний посібник. / Воронін А. М., Зіатдінов Ю. К., Климова А. С. – К. : НАУ-друк, 2019. – 136с.

36. Згуровський, М.З. Основи системного аналізу. [Текст] / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: Видавнича група BVH, 2007. —546 с.

37. Лисенко В.П., Штепа В.М. Порівняння моделей процесу електрохімічної очистки стічних вод птахофабрики, отриманих методами математичної статистики та ANFIS // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації – Луганськ: МАІ – 2007. – № 1 (14). – С. 37-40.

38. Лисенко В.П., Штепа В.М. Синтез енергоефективної адаптивної системи керування електрокоагуляційною очисткою стічних вод птахофабрики на основі гібридних нейронних мереж // Аграрна наука і освіта - К.: НАУ – 2007. – Т.8 № 1-2. – С. 77-83.

39. Нейротехнології та нейрокомп'ютерні системи: підручник / Л.С. Ямпольський, О.І. Лісовиченко, В.В. Олійник – К.: «Дорадо-Друк», 2016. – 576 с. ISBN 978-966-2077-69-8

40. Пушкар, О. І., Гіковатий В. М., Євсєєв О. С., Потрашкова Л. В. Системи підтримки прийняття рішень: навч. посібник. Харків : Інжек, 2006. 304с.

41. Лисенко В.П., Ботвин В.Л. Інструментальні засоби розробки і налагодження мікропроцесорних систем – К.: НАУ, 2004 р. – 118 с.

42. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні [Текст] : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Л. С. Ямпольський , Б. П. Ткач, О. І. Лісовиченко ; МАУП. - К. : Персонал, 2011. - 543 с.іл.

43. View of Artificial Neural Networks Advantages and Disadvantages. *Mesopotamian Academic Press*. URL: <https://mesopotamian.press/journals/index.php/bigdata/article/view/225/209> (date of access: 01.11.2024).

44. Охорона праці в галузі : метод. вказ. до виконання самост. роб. для студ. денної форми навчання спец. 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / [уклад. : В. О. Зубенко, Р. В. Жесан, І. А. Березюк, О. П. Голик] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. 24 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10850>

45. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text>

46. Конституція України. Київ : Вид-во Паливода А. В., 2019. 76 с.

47. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.

48. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80>

49. Охорона праці : метод. вказ. для виконання лаб. роб. для студ. спец. 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / [уклад. : В. О. Зубенко, Р. В. Жесан, І. А. Березюк, Є. П. Босов] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. 90 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10847> (дата звернення: 03.10.2023).

50. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text>

51. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

52. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text>

53. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.

54. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840>

55. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14>

56. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 12.11.2023).

ДОДАТКИ