

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

На правах рукопису

УДК 004.896

СТЕЦЕНКО АНАСТАСІЯ МИХАЙЛІВНА

**АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ ПІДГРУНТОВОМУ
ЗВОЛОЖЕННІ З ВРАХУВАННЯМ ЗБУРЕНЬ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Пастушенко Володимир Йосипович
кандидат технічних наук, доцент

Рівне - 2015

ЗМІСТ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 6 |
| ВСТУП..... | 7 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 19 |
| 1.1 Аналіз функціонування зрошувального та осушувального землеробства, визначення еколого-економічних проблем його розвитку..... | 19 |
| 1.2 Аналіз існуючих методів та технічних засобів керування волозабезпеченістю сільськогосподарських культур на системах з підґрунтовим зволоженням..... | 30 |
| 1.2.1 Методи та технічні засоби контролю вологозабезпеченості сільськогосподарських культур..... | 30 |
| 1.2.2 Методи та технічні засоби автоматизованого водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах..... | 32 |
| 1.3 Використання методів нечіткої логіки та нейронних мереж для керування об'єктами та технологічними процесами в умовах дії збурень..... | 45 |
| 1.3.1 Використання нечіткої логіки у меліорації, гідрології, керуванні водними ресурсами..... | 45 |
| 1.3.2 Використання нейронних мереж у меліорації, гідрології, керуванні водними ресурсами..... | 49 |
| 1.4 Мета роботи і задачі дослідження..... | 53 |
| 1.5 Основні результати і висновки до розділу..... | 54 |
| РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В НЕНАСИЧЕНІЙ ЗОНІ МОДУЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ ГРУНТУ..... | 56 |
| 2.1 Структура осушувально-зволожувальної системи Рівненської дослідної сільськогосподарської станції..... | 56 |
| 2.2 Визначення факторів впливу на ріст та розвиток | 57 |

| | | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| | сіськогосподарських культур..... | |
| 2.3 | Розробка структурної схеми автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сіськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні..... | 60 |
| 2.4 | Розробка математичних моделей вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нейронних мереж..... | 62 |
| 2.4.1 | Розробка математичної моделі вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення..... | 62 |
| 2.4.2 | Розробка математичної моделі вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нео-фаззі мереж | 77 |
| 2.5 | Математичне моделювання вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту на основі диференційного рівняння..... | 90 |
| 2.5.1 | Ідентифікація коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейромережових технологій..... | 90 |
| 2.5.2 | Розрахунок вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту..... | 110 |
| 2.6 | Порівняльний аналіз результатів моделювання вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту..... | 124 |
| 2.7 | Розробка математичної моделі колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту..... | 126 |
| 2.8 | Основні результати і висновки до розділу..... | 132 |
| РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ | | |
| ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІСЬКОГосподарських | | |
| КУЛЬТУР ПРИ ПІДґрунтового зволоженні..... | | |
| 3.1 | Розробка методу керування вологозабезпеченістю сіськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні на основі нейронних мереж..... | 133 |
| 3.1.1 | Розробка методу керування вологозабезпеченістю сіськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення.. | 133 |

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.2 | Розробка методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі нео-фаззі мереж..... | 145 |
| 3.2 | Моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, дослідження її динамічних властивостей... | 151 |
| 3.3 | Оптимізація енергетичних затрат і витрат води в автоматизованій системі керування вологозабезпеченістю з врахуванням очікуваної врожайності сільськогосподарських культур..... | 158 |
| 3.4 | Розробка методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки..... | 163 |
| 3.5 | Основні результати і висновки до розділу..... | 171 |
| РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ ПІДГРУНТОВОМУ ЗВОЛОЖЕННІ..... | | 172 |
| 4.1 | Розробка апаратної частини автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю..... | 172 |
| 4.1.1 | Гідравлічний регулятор для керування рівнем ґрунтових вод..... | 172 |
| 4.1.2 | Розробка апаратної частини автоматизованої системи керування.. | 174 |
| 4.2 | Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю..... | 194 |
| 4.2.1 | Розробка програмного забезпечення нижнього рівня автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю..... | 194 |
| 4.2.2 | Розробка програмного забезпечення верхнього рівня автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю..... | 196 |
| 4.3 | Впровадження розробленої автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур..... | 205 |
| 4.4 | Основні результати і висновки до розділу..... | 223 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВИСНОВКИ..... | 224 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 227 |
| ДОДАТОК А. Схема експериментальної ділянки Рівненської дослідної сільськогосподарської станції..... | 243 |
| ДОДАТОК Б. Фактори впливу на ріст та розвиток сільськогосподарських культур..... | 244 |
| ДОДАТОК В. Навчальна та тестувальна вибірки даних Рівненської дослідної сільськогосподарської станції..... | 253 |
| ДОДАТОК Г. Вагомість вхідних сигналів при навчанні та тестуванні багатошарових нейромереж..... | 257 |
| ДОДАТОК Д. Основні гідрофізичні характеристики для суглинистих ґрунтів Рівненської дослідної осушувально-зволожувальної системи..... | 262 |
| ДОДАТОК Е. Система основних рівнянь процесів вологопереносу в ґрунтах..... | 264 |
| ДОДАТОК Ж. Вагомість вхідних сигналів при навчанні та тестуванні нейрорегуляторів..... | 285 |
| ДОДАТОК И. Схеми для моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю..... | 289 |
| ДОДАТОК К. Функціональна схема автоматизації Обухівської осушувально-зволожувальної системи..... | 310 |
| ДОДАТОК Л. Навчальна та тестувальна вибірки даних Обухівської сільськогосподарської станції..... | 311 |
| ДОДАТОК М. Документи, що підтверджують впровадження..... | 317 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|-----|-------------------------------------|
| АРМ | Автоматизоване робоче місце |
| АСК | Автоматизована система керування |
| БД | База даних |
| ВГР | Вологість гальмування росту |
| ВЗ | Вологість зав'ядання |
| ВС | Вимірювальна станція |
| ДК | Дренажний колектор |
| ЗБ | Зволожувальний басейн |
| ЗК | Зволожувальний колектор |
| ЕК | Електромагнітний клапан |
| МВБ | Метод водного балансу |
| МРВ | Максимальна рівноважна вологість |
| МТБ | Метод теплового балансу |
| НВ | Найменша вологоємність |
| НМ | Нейронна мережа |
| НС | Насосна станція |
| ОГХ | Основна гідрофізична характеристика |
| ОЗС | Осушувально-зволожувальна система |
| ОК | Об'єкт керування |
| ПВ | Повна вологоємність |
| ПЗ | Програмне забезпечення |
| ПК | Персональний комп'ютер |
| РГВ | Рівень ґрунтових вод |
| ТЗ | Технічні засоби |
| ТЗА | Технічні засоби автоматизації |
| ШНМ | Штучна нейронна мережа |

ВСТУП

Проблема керування вологозабезпеченням сільськогосподарських культур у цілому світі є надзвичайно важливою. Перетворення сільськогосподарського виробництва у високорозвинутий сектор економіки неможливе без зменшення його залежності від несприятливих природо-кліматичних умов шляхом ведення зрошувального землеробства у зонах недостатнього та нестійкого зволоження. Зрошувальне землеробство є важливою складовою виробництва продукції рослинництва, стабілізуючим фактором продовольчого та ресурсного забезпечення держави, особливо в роки з несприятливими погодними умовами. В залежності від кліматичних умов, рельєфу, глибини залягання ґрунтових вод застосовують різні види зрошення: краплинне, дощування, полив по смугам і борознам, підґрунтове. На територіях з надмірним зволоженням для зменшення вологості ґрунту до необхідного для сільськогосподарських культур рівня застосовують осушувальні системи. На територіях з глибиною залягання ґрунтових вод до 1.5-2 м та рівнинним рельєфом широко застосовують підґрунтове зволоження. Прикладами є західна та центральна частини України, Білорусь.

Осушені землі в Україні становлять 3.2 млн. га, майже 70 % з них мають закритий дренаж, на 1.1 млн. га застосовується двостороннє регулювання водного режиму. На даний час технічний стан внутрішньогосподарських осушувальних систем потребує покращення шляхом модернізації та докорінної реконструкції. Крім того, через незадовільний технічний стан меліоративної мережі в посушливі роки не на всій площі використовуються за призначенням системи двобічної дії. Існує потреба відновлення ефективного функціонування наявних меліоративних систем на осушуваних землях, що не повною мірою забезпечується шляхом використання ручного режиму регулювання вологості ґрунту. Існуючі засоби водорегулювання потребують вдосконалення у напрямку покращення точності регулювання рівнів води, врахування впливу випадкових зовнішніх збурень, забезпечення ресурсозберігаючих режимів

зрошення сільськогосподарських рослин в умовах дефіциту водних та енергетичних ресурсів, що створить умови для ефективного ведення землеробства. Актуальність теми узгоджується з “Комплексною програмою розвитку меліорації земель та поліпшення екологічного стану зрошувальних та осушених угідь у 2001-2005 роках та прогноз до 2010 року”, де одним з головних завдань є удосконалення систем управління технологічними процесами та впровадження новітніх технологій і технічних засобів при комплексній реконструкції, модернізації та експлуатації меліоративних систем.

Розробкою автоматичних регулюючих пристроїв, які використовуються на осушувально-зволожувальних системах, та проблемами прийняття рішень в задачах управління зрошенням займалися Ю.А. Балан, Б.О. Баховець, С.Ю. Бочаров, С.Т. Вознюк, О.І. Жовтоног, П.І. Коваленко, П.І. Ковальчук, Ю.Г. Ковальчук, М.О. Лазарчук, Л.І. Леві, С.К. Матус, Т.О. Михальська, О.М. Наумчук, О.Я. Олійник, В.Й. Пастушенко, Г.С. Поляков, А.М. Рокочинський, А.Ф. Рубан, О.І. Тищенко, М.М. Хлапук, Б.І. Чалий, А.В. Яцик та інші.

Актуальність теми. Як відомо, максимальна врожайність сільськогосподарських культур досягається при оптимальній кількості вологи, живлення, тепла, повітря і світла. При цьому необхідний для сільськогосподарських культур водний режим ґрунту створюється відповідним режимом зрошення, який встановлює норми, терміни і кількості поливів в залежності від біологічних особливостей культур, природних і господарських умов. При визначенні витрат води на зрошення враховують водоспоживання, або сумарне випаровування, що залежить від кліматичних умов, кількості теплової енергії, яка надходить на поверхню, вологості ґрунту, виду та врожайності культури.

Питання управління водогосподарсько-меліоративними об'єктами у зоні надлишкового та нестійкого зволоження України на рівнях стратегічного та тактичного планування на основі поєднання короткотермінового та довготермінового метеорологічних прогнозів розглядалися у публікації [30]. У

роботі [78] розроблено метод управління вологістю ґрунту на основі багат шарової моделі вологопереносу. Однак залишаються відкритими питання адаптації і самонавчання автоматизованих систем керування вологістю ґрунту в умовах дії випадкових погодних факторів, зміни характеристик об'єкта керування; підвищення точності керування завдяки оперативному врахуванню дії збурень на об'єкт, забезпечення отримання планової врожайності сільськогосподарських культур при раціональному використанні енергетичних і водних ресурсів. Крім того, сучасні системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур повинні не тільки забезпечувати достатню точність керування, а й прогнозувати потребу рослин у воді на певний період, мінімізувати енергетичні та водні витрати без втрати врожаю, бути надійними та зручними в експлуатації, надавати оператору повну та своєчасну інформацію про значення усіх параметрів та стан системи керування. Комплексне вирішення цих проблем можливе лише за допомогою розробки сучасних технічних засобів автоматизації, нових математичних моделей вологопереносу у ненасиченій зоні ґрунту та методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур. Таким чином, розробка методів автоматизованого керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахуванням збурень є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідної роботи кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування «Розробка та дослідження елементів і систем автоматизації та їх моделювання», № ДР 0110U000-823, в якій автор брала участь як співвиконавець, що виконувалася відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №1704 від 16.11.2000 р. «Про комплексну програму розвитку меліорації земель і поліпшення екологічного стану зрошуваних та осушених угідь на період до 2010 року» (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 863 (863-2006-п) від 24.06.2006 р.). Робота спрямована на підвищення ролі меліорованих земель

у продовольчому та ресурсному забезпеченні держави, зменшення залежності сільськогосподарського виробництва від несприятливих природно-кліматичних умов, поліпшення екологічного стану сільськогосподарських угідь та створення екологічно безпечних умов експлуатації меліоративних систем шляхом розробки нових методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур та автоматизації осушувально-зволожувальних систем на основі передових технологій.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка моделей і методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах з підґрунтовим зволоженням для підвищення ефективності функціонування цих систем та забезпечення отримання гарантованих врожаїв сільськогосподарських культур з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети планується вирішити наступні задачі:

1. Аналіз існуючих методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, математичних моделей вологопереносу.

2. Розробка прогнозуючих математичних моделей вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нейронних мереж; математичне моделювання процесу вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту на базі диференціального рівняння; розробка математичної моделі колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту.

3. Розробка методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням дії збурень на основі нейронних мереж; при крапельному зволоженні – на основі нечіткої логіки з врахуванням впливу випадкових збурень на об'єкт; оптимізація енергетичних затрат і витрат води в автоматизованій системі керування вологозабезпеченістю з врахуванням очікуваної врожайності сільськогосподарських культур.

4. Удосконалення структури гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії на базі мікропроцесорного модуля.

5. Розробка та впровадження програмного забезпечення та апаратної частини автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах з підґрунтовим зволоженням.

Предметом дослідження є математичні моделі, методи та системи автоматизованого керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням діючих збурень.

Методи дослідження. Методи математичного та імітаційного моделювання, теорії нейронних мереж та нечіткої логіки використано для побудови моделей вологопереносу, моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, розробки методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому та крапельному зволоженні. Методи теорії автоматичного керування використано для розробки структури автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, розробки методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, вдосконалення структури гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії. Чисельні методи розв'язку диференційних рівнянь в частинних похідних використано для математичного моделювання вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту на основі диференційного рівняння. Методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності використано для оптимізації енергетичних затрат і витрат води в автоматизованій системі керування вологозабезпеченістю з врахуванням очікуваної врожайності сільськогосподарських культур.

Наукова новизна. При вирішенні поставлених задач одержані нові наукові результати:

1. Вперше:

- розроблено прогнозуючі математичні моделі ненасиченої зони модульної ділянки ґрунту як об'єкту керування, які відрізняються тим, що в їх

основі лежать статичні багат шарові штучні нейронні мережі прямого розповсюдження та нео-фаззі нейронні мережі, що дозволило суттєво підвищити точність прогнозування всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту;

- розроблено метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасиченої зони ґрунту, який відрізняється тим, що в його основі лежать статичні багат шарові штучні нейронні мережі прямого розповсюдження, що дозволило суттєво підвищити точність його визначення;

- розроблено методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі статичних багат шарових штучних нейронних мереж прямого розповсюдження і нео-фаззі нейронних мереж з врахуванням збурень, структура контурів керування, що дозволило підвищити точність керування вологозабезпеченістю, оперативність процесу прийняття рішень;

- застосовано інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, що дозволило економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю.

2. *Удосконалено* структуру гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії, в яку введено додаткові електромагнітні клапани, давачі рівня води, кількості опадів, температури та відносної вологості повітря, швидкості вітру та мікропроцесорний блок керування, обладнаний безпроводним інтерфейсом зв'язку, що дозволило підвищити швидкодію роботи та опрацювання інформації, точність керування вологістю кореневого шару ґрунту.

Теоретична цінність і прикладна значущість отриманих результатів. Одержані у дисертаційній роботі результати можуть бути використані в процесі проектування, розробки, впровадження нових та модернізації існуючих систем автоматизації осушувально-зволожувальних систем, а саме:

- математичні моделі вологопереносу у ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нейронних мереж для прогнозування зміни вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в умовах дії збурень; для перевірки ефективності роботи різних методів керування, а також у складі автоматизованого робочого місця диспетчера осушувально-зволожувальної системи (ОЗС) і служити зручним інструментом для планування і керування режимами зволоження сільськогосподарських культур;

- удосконалений гідравлічний регулятор вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії на базі мікропроцесорного блоку керування з безпроводним інтерфейсом зв'язку, що включений у загальну інформаційну систему керування та збору даних, дозволяє підвищити швидкість роботи та опрацювання інформації, точність керування вологістю кореневого шару ґрунту та покращити роботу автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур;

- методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі нейронних мереж та при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки з оперативним врахуванням випадкових погодних збурень дозволяють підвищити точність керування вологістю ґрунту, забезпечити отримання планових врожаїв сільськогосподарських культур, економити водні та енергетичні ресурси за рахунок їх раціонального використання; підвищити ефективність функціонування ОЗС та забезпечити її незалежність від кліматичних і погодних умов;

- технічна реалізація та програмне забезпечення автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченістю дозволяють надавати відомості оператору про значення усіх технологічних параметрів у реальному часі, змінювати режим роботи; вести базу даних технологічних параметрів.

Результати роботи апробовані на реальних даних Рівненської дослідної сільськогосподарської станції та впроваджені в Обухівському міжрайонному управлінні водного господарства м. Обухів Київської обл. (акт від 20 червня 2012 р.). Результати досліджень використовуються у навчальному процесі при

підготовці фахівців з напрямку 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» та спеціальності 7.05020201, 8.05020201 «Автоматизоване управління технологічними процесами» у Національному університеті водного господарства та природокористування м. Рівне (акт від 01 жовтня 2015 р.). Наукові положення і результати дисертаційних досліджень використовуються у науково-дослідній роботі студентів, дипломному проектуванні та підготовці магістерських робіт зі спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами».

Особистий внесок у розробку наукових результатів. Дисертація є самостійною роботою автора. В опублікованих наукових працях здобувачеві належать такі результати: [36] – структурна схема АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням збурень, математична модель ненасиченої зони ґрунту та метод керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення з 11-ма та 7-ма входами відповідно; [40] – метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ґрунту за допомогою нейронних мереж; [42] – методи керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення та нео-фаззі мереж з 5-ма входами; [35] – метод керування вологістю ґрунту та технічна реалізація АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з використанням методів нечіткої логіки; [37] – структурна схема, метод керування та технічна реалізація АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні; [38] – метод керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі адаптивних нейро-фаззі мереж з 7-ма входами, технічна реалізація апаратно-програмного комплексу інтелектуальної АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні з врахуванням збурень; [39] – інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур; [41] – математична модель прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах

ненасиченої зони ґрунту за допомогою нео-фаззі мереж з 5-ма входами; [43] – математична модель вертикального вологопереносу в ґрунті на базі методу Ньютона-Рафсона та нейронних мереж різної архітектури; [67] – удосконалена конструкція гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії на базі мікропроцесорного модуля; [44; 45] – багат шарові нейронні моделі з різною кількістю вхідних параметрів (3, 4, 7, 11) для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту; [46] – математичні моделі для прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту на основі адаптивних нейро-фаззі мереж з 7-ма входами; [47] – система прогнозування вологозабезпечення сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням збурень на базі нейронних мереж різної топології; [48; 50] – математична модель ненасиченої зони ґрунту і метод керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення та адаптивних нейро-фаззі мереж з 11-ма та 7-ма входами відповідно, моделювання АСК вологозабезпеченістю; [49] – метод керування вологозабезпеченістю при крапельному зволоженні в умовах дії випадкових погодних впливів на основі нечіткої логіки; [51, 53] – інформаційна та технічна структура АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому та крапельному зволоженні; [52] – корекція рівня ґрунтових вод (РГВ), обчисленого нейрорегулятором, за допомогою методів прийняття рішень в умовах багатокритеріальності; [54] – метод ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейронних мереж; [55; 56; 82] – програмно-апаратне забезпечення АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на меліоративних системах двосторонньої дії з врахуванням збурень; [57; 83] – метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з використанням багат шарових нейронних мереж з 11-ма входами, математичної моделі ненасиченої зони ґрунту на основі диференційного рівняння вологопереносу; [58, 59] – математична модель ненасиченої зони ґрунту та метод керування вологістю на основі нео-фаззі мереж з 5-ма входами;

[60] – дослідження різних архітектур багат шарових нейронних мереж прямого поширення для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та керування вологістю в АСК з підґрунтовим зволоженням; [61; 62] – математична модель для прогнозування та керування всмоктуючим тиском ґрунту на базі багат шарових нейронних мереж з 5-ма входами; [63] – моделювання динаміки вологозапасів для трьох шарів ґрунту на основі методу Ньютона-Рафсона; [64; 65; 66] – математичні моделі для прогнозування і методи керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі нейронних мереж різної архітектури, технічна реалізація та програмне забезпечення АСК; [84] – впровадження математичної моделі вертикального вологопереносу та методу керування вологістю ґрунту на основі нео-фаззі мереж на Обухівській ОЗС.

Планування основних напрямків роботи, обговорення результатів та підготовка публікацій проходило за участю наукового керівника Пастушенка В.Й.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи та основні наукові положення доповідалися на 28 міжнародних науково-технічних конференціях:

1. II Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 85-річчю НУВГП “Актуальні проблеми водного господарства та природокористування” (21-22.11.2007, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). 2-7. International Conference Problems of Decision Making Under Uncertainties (PDMU) (12-17.05.2008, Київ-Рівне, Інститут прикладного системного аналізу «КПІ» - Національний університет водного господарства та природокористування; 27-30.04.2009, Східниця, Львівська обл.; 5-9.10.2009, Кам’янець-Подільський-Сатанів; 17-21.05.2010, Львів, Національний університет ім. І. Франка; 17-21.09.2012, Брно, Чехія; 11-15.05.2015, Східниця, Львівська обл.). 8-10. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (СИЕТ) (19-23.05.2008, 18-22.05.2009, 24-28.05.2010, Одеський національний політехнічний університет). 11. Десята міжнародна науково-технічна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології» (20-24.05.2008, Інститут прикладного

системного аналізу Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”). 12-19. Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика) (23-26.09.2008, Одеська національна морська академія; 22-25.09.2009, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича; 26-29.09.2010, Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки; 28-30.09.2011, Львів, Національний університет «Львівська політехніка»; 26-28.09.2012, Київ, Національний університет харчових технологій; 25-27.09.2013, Миколаїв, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; 23-27.09.2014, Київ, Національний технічний університет України «КПІ»; 10-11.09.2015, Одеса, Одеський національний політехнічний університет). 20. 10th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (24-28.02.2009, Поляна). 21. III Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми водного господарства та природокористування» (21-23.10.2009, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). 22. 10-та Ювілейна міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії», присвячена 165-й річниці Національного університету «Львівська політехніка» (TCSET) (23-27.02.2010, Львів – Славське). 23. Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті» (8-9.04.2010, Луцьк, Луцький національний технічний університет). 24. 15-й Ювілейний Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті» (18-20.04.2011, Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки). 25. Міжнародна науково-практична конференція іноземних студентів «Розвиток національних економік в умовах глобалізації» (25-27.10.2012, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). 26. Всеукраїнська наукова конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (22-23.02.2013, Рівне, Рівненський державний гуманітарний університет -

Національний університет водного господарства та природокористування). 27. III Міжнародна науково-практична конференція «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу» (10-15.02.2014, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). 28. I Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014» (16-17.04.2014, Київ, Національний технічний університет України «КПІ»).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 36 друкованих працях, з яких 9 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук, з них 1 стаття входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus; 26 тез та матеріалів доповідей на науково-технічних конференціях, з них 2 тез входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS. Отримано 1 патент України на корисну модель.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз функціонування зрошувального та осушувального землеробства, визначення еколого-економічних проблем його розвитку

Проблема керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у цілому світі є надзвичайно важливою. Перетворення сільськогосподарського виробництва у високорозвинутий сектор економіки неможливе без зменшення його залежності від несприятливих природо-кліматичних умов, шляхом ведення зрошувального землеробства у зонах недостатнього та нестійкого зволоження. Крім того, із ростом населення людство змушено підвищити продуктивність використання обмежених природних ресурсів: землі, води та поживних речовин.

Посушливі і напівпосушливі регіони визначаються як території, де вода є дефіцитом [132; 134]. Гідрологічний режим у цих регіонах є екстремальним і швидко змінним, де повені, спричинені одиночними ураганами, можуть перевищувати загальну кількість опадів за декілька років. В загальному, на цих територіях є проблема у керуванні прісноводними ресурсами та у доставці прісної води. Дані проблеми ускладнюються з ростом населення, підвищенням рівня домашнього споживання води, розширенням сільського господарства, ростом забруднення і загрозою зміни клімату. Як результат постійного росту населення, навантаження на водні ресурси зростає. У багатьох випадках, поточне керування водними ресурсами є нестійким і призводить до серйозних проблем, таких як збіднення водоносних горизонтів, акумулювання шкідливих речовин до загрозливих рівнів, водних конфліктів або економічно необґрунтованих витрат. Однак, є лише деякі рекомендації щодо гідрології посушливих територій і мало засобів підтримки прийняття рішень, які потрібні для передбачення паводків і керування водними ресурсами [132; 134]. В результаті ЮНЕСКО ініціювала створення Глобальної мережі для води та

розвитку інформації у посушливих регіонах (G-WADI). Серед великих посушливих регіонів можна виділити Африку, Середню Азію, США, Індію, Австралію [132; 134].

Для керування водними ресурсами на даних територіях проводилися різні дослідження. Зокрема, проводилися дослідження випадання опадів, зміни рівня ґрунтових вод від короткочасних потоків, моделювання оцінки водних ресурсів у Саудівській Аравії (H.S. Wheater [132; 134]); оцінка опадів, річкового стоку та форми хмар за допомогою аналізу супутникового знімку досліджуваної території за допомогою нейронних мереж в Австралії, США, Мексиці та Північній Африці (програмне забезпечення (ПЗ) Persiann) (S. Sorooshian, K.-L. Hsu, V. Imam, Y. Hong [134]); моделювання гідрологічних та водних ресурсів у Північній Африці (D.A. Hughes [134]); моделювання руслового стоку в залежності від опадів і температури повітря, відношення кількості опадів до потенціальної евапорації вздовж Австралії (B.F.W. Croke, A.J. Jakeman [134]); дослідження впливу процесів інфільтрації, поверхневого стоку, ерозії від водорозділів (ПЗ KINEROS2), розроблено географічно-інформаційну систему (ГІС) «Автоматична географічна оцінка водо розділів» (AGWA) (D.J. Semmens, D.C. Goodrich, C.L. Unkrich, R.E. Smith, D.A. Woolhiser, S.N. Miller [134]); моделювання нетривалих потоків і створення наносів у посушливих регіонах Індії (K.D. Sharma [134]); розроблено модульну систему моделювання (MMS) для керування водними та природними ресурсами (Північна Африка, Китай) (G.H. Leavesley, S.L. Markstrom, R.J. Viger, L.E. Hay [134]); дослідження калібрування, невизначеності та регіональний аналіз концептуальних моделей опадів та водних стоків (H.S. Wheater, N. McIntyre, T. Wagener [134]); прогнозування потоків та рівнів річок у реальному часі у напівпосушливих територіях Західної Австралії (P.C. Young [134]); прогнозування паводків у реальному часі в Індії (R.D. Singh [134]); моделювання ґрунтових вод в Індії (S. Ahmed, J.-C. Mar'échal, E. Ledoux, G. de Marsily [134]) [132; 134].

На сьогоднішній день відомими є моделі поповнення запасів води у посушливих і напівпосушливих територіях за допомогою ізотопного та

геохімічних методів, ландшафтні гідрогеологічні та гідрогеохімічні дослідження (Північна Африка, зокрема, Сахара) (W.M. Edmunds [133]). Досліджувалося переміщення ґрунтових вод (США). При цьому модель ґрунтових потоків включала в себе симулятор для обробки параметрів водоносних горизонтів, граничних умов, внутрішніх витоків і стоків у якості входів і водних потоків у якості виходу. Дані про водні потоки використовувалися у традиційних транспортних моделях разом з пористістю, коефіцієнтом дифузії та надходженням розчинених речовин. (J. Carrera, S.A. Mathias [132]). Проводилося моделювання руху ґрунтових вод на базі теорії розділення змінних (США) (S. Ahmed, S. Sarah, A. Nabi, S. Owais [133]). Розглядалися питання змінної щільності ґрунтових вод, концентрації у них солей (C.T. Simmons, P. Bauer-Gottwein, T. Graf, W. Kinzelbach, H. Kooi, L.Li, V. Post, H. Prommer, R. Therrien, C. I. Voss, J. Ward, A. Werner [133]); керування водними ресурсами у посушливих і напівпосушливих територіях Північно-Західної Африки та Китаю, зокрема практика неправильного зрошення в Китаї і, як наслідок, засолення ґрунтів та екологічні проблеми вниз за течією річки Янцзи, збіднення водних горизонтів Північно-Західної Сахари (W. Kinzelbach, P. Brunner, A. von Boetticher, L. Kgotlhang, C. Milzow [133]). У роботі [109] проведено моделювання водних ресурсів Саскачевану (Канада). У роботі [130] досліджені процеси зміни рівня ґрунтових вод, русла р. Сава (Словенія)

Проведені дослідження гідрології долин, каналів і понижених частин рельєфу у посушливих і напівпосушливих територіях (Аравійський півострів, Туреччина). Ці канали і долини пересихають, але заповнюються водою під час дощів. Паводки, які трапляються на даних територіях, з одного боку, несуть у собі загрозу місцевому населенню, але з іншого, є джерелом живлення ґрунтових вод. Для дослідження даних процесів необхідно моделювати і вимірювати такі основні параметри, як опади, поверхневий стік, інфільтрація, паводки, евапорація. Гідрологічні характеристики посушливих і напівпосушливих територій відрізняються від характеристик вологих територій [126]. Розглядаються питання методології просторової емуляції параметрів у

галузях науки, що займаються проблемами метеорології, дослідження ґрунту, гідрології. Збір даних про параметри ґрунту і навколишнього середовища є складною, дороговартісною задачею і вимагає особливих спостережень для точного представлення [125]. Також вивчаються питання зміни клімату, атмосферних явищ, забруднення навколишнього середовища, відновних та невідновних джерел енергії [124].

У роботі [122] досліджувалися моделі типу вода - врожайність культур – добрива, проводилося моделювання зміни вологості ґрунту, ґрунтових і дренажних вод, вмісту солей у ґрунті, врожайності сільськогосподарських культур (модель SALTMED) на основі досліджень в Італії, Греції, Сербії, Єгипті, Сирії, Ірані, Бразилії, Португалії, Данії, Марокко; моделювання руху води, тепла і багатокомпонентних розчинів (модель HYDRUS); моделювання запасів ґрунтових вод та азоту, росту і розвитку рослин, їх врожайності, рослинних залишків та їх розпаду, ерозії та засолення ґрунту (модель CropSyst); моделювання зміни вологості та всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю в залежності від рівня ґрунтових вод, випаровування з поверхні ґрунту та метеоумов (моделі SWAP, CERES, WOFOST, MACRO) на основі досліджень в Ірані, Голандії, Італії; моделювання ефекту від кількості поливів, засолення та вимивання поживних речовин з ґрунту, врожайності сільськогосподарських культур (модель ENVIRO-GRO); моделювання споживання води у системі ґрунт-рослина (моделі WAVE, EURO-ACCESS II).

Для представлення зв'язку між різними властивостями ґрунтів рядом вчених (J. Bouma, van Lanen, Ya. Pachepsky, J. Tamasella, M. Hodnett, J.H.M. Wosten, A. Nemes, W.J. Rawls, R. Walczak, B. Witkovska-Walczak, C. Slavinski, V. Stekauerova, J. Sutor [117-119]) розроблялися педотрансферні функції, що будуються на основі регресійного аналізу дослідних даних і відображають зв'язок між властивостями ґрунту і його гідрологією. Так, дані функції розроблені для тропічних ґрунтів (J. Tamasella, M. Hodnett [117-119]), ґрунтів Європи (J.H.M. Wosten, A. Nemes [117-119]), США (W.J. Rawls [117-119]),

Польщі (R. Walczak, B. Witkowska-Walczak, C. Slavinski [117-119]), Словаччині (V. Stekauerova, J. Sutor [117-119]).

Нестача питної води на деяких територіях є однією з найбільшою світових проблем. У багатьох країнах з дефіцитом води необхідно приділити увагу керуванню наявними ресурсами ґрунтових вод, оскільки основні водоносні горизонти вже ідентифіковані. Ґрунтові води надзвичайно важливі у посушливих і напівпосушливих територіях, де є нестача джерел поверхневих вод у зв'язку із малою кількістю опадів та високою евапотранспірацією.

Моделювання ґрунтових вод дозволяє дати відповіді на багато складних запитань у ході гідрологічних досліджень. На даний час таке моделювання стало невід'ємною частиною у розумінні і ефективному керуванні системами водоносних горизонтів. Декілька із важливих задач вирішуються завдяки моделюванню ґрунтових вод: оцінка природного відновлення, розуміння механізмів руху води, ідентифікація ефекту граничних умов, розуміння взаємодії між водоносним горизонтом і поверхневими водами, оцінка ступеня забруднення, прогнозування розподілу концентрації у просторі і часі, прогнозування ефекту від впровадження різноманітних схем або корективних заходів.

Зрошення є специфічною проблемою. В Індії та Північному Китаї, наприклад, площа зрошуваних земель зросла з 25% культивованих земель у 1960 році до понад 50% у 90-і роки. Джерела води для зрошення дуже відрізняються у різних країнах і залежать від кліматичних та гідрологічних умов, стратегій розвитку держави. Понад 50% зрошуваних земель Індії зволожуються від ґрунтових вод, 80% з них знаходяться у напівпосушливих територіях; 43% - в США, 27% - в Китаї, 25% - у Пакистані. На даний час підґрунтові водоносні горизонти збіднюються. Криза води в Індії найбільш відчутна у західній і півострівній частинах, де гостра нестача води прогнозується на найближчі 25 років. Кліматологічно значна частина півдня Індії є напівпосушливою на межі з посушливою територією із сезонними опадами до 500 мм і високою евапотранспірацією до 1800 мм. В Індії в

загальному 48% земель є напівпосушливими, 25% - посушливими, які включають 55 пустель. У напівпустельних територіях Індії природні гідрологічні та гідрогеологічні системи дуже різноманітні. Водні ресурси включають в себе опади, поверхневі та ґрунтові води. Поверхневі води з тимчасових потоків, річок та водойм забезпечують живлення ґрунтових вод. Ґрунтові води, у свою чергу, забезпечують живлення річок, тому ґрунтові та поверхневі водні ресурси повинні розглядатися разом у плануванні і керуванні ними [132; 134].

В Україні території з недостатнім або нестійким зволоженням охоплюють майже дві третини території. Сьогодні площа зрошуваних земель в Україні складає 2.2 млн. гектарів або 6.7% площі сільськогосподарських угідь. Ці землі є національним багатством та страховим фондом держави у забезпеченні продукцією рослинництва. Зрошуване землеробство застосовується у різних країнах по всьому світі, оскільки є важливою складовою виробництва продукції рослинництва, стабілізуючим фактором продовольчого та ресурсного забезпечення держави, особливо в роки з несприятливими погодними умовами [94; 116-118; 119; 122-125; 131-133]. В залежності від кліматичних умов, рельєфу, глибини залягання ґрунтових вод застосовують різні види зрошення: краплинне, дощування, полив по смугам чи борознам, підґрунтове. На територіях з надмірним зволоженням застосовують осушувальні системи, щоб зменшити вологість ґрунту до необхідного для сільськогосподарських культур рівня. На територіях з глибиною залягання ґрунтових вод до 1.5-2 м та рівнинним рельєфом широко застосовують підґрунтове зволоження. Прикладом є західна та центральна частина України, Білорусь.

Таким чином, керування водними ресурсами є актуальною проблемою у цілому світі.

Осушувально-зволожувальні системи. Осушувальна система являє собою комплекс каналів, колекторів, дрен і гідротехнічних споруд, які дозволяють проводити скид надлишкових поверхневих вод та вод із кореневмісного шару ґрунту.

Осушувально-зволожувальні системи, на відміну від осушувальних, краще оптимізують умови росту сільськогосподарських культур в різних фізико-географічних умовах. ОЗС складаються з двох частин, осушувальної – для відведення надлишкової води, і зволожувальної – для подачі води в кореневмісний шар ґрунту. Склад і конструкція зволожувальної частини системи залежить від методів і способів зволоження. За конструкцією осушувально-зволожувальні системи поділяються на [31; 85]:

1. Осушувально-зволожувальні системи зі зволоженням земель за допомогою інфільтрації води із каналів і дрен. Ці системи застосовують на ділянках із рівнинним рельєфом і добре проникних ґрунтах. Загальний цикл зволоження на таких система триває 6-10 діб, а коефіцієнт фільтрації не менше ніж 0,8-1 м/добу. Регулювання подачі та скидів води здійснюється шлюзами-регуляторами, які влаштовують на осушувальних каналах з використанням попереджувального та зволожувального шлюзування.

Попереджувальне шлюзування здійснюється шляхом затримки в каналах частини весняного паводку для підтримання рівнів ґрунтових вод (РГВ) на рекомендованій нормі осушення. Цей прийом ефективний на початку вегетаційного періоду для систем, площа водозбору осушувальної частини в яких перевищує площу шлюзування в 15-30 разів [16]. Зволожувальне шлюзування проводиться шляхом подачі води із наявного водного джерела у відкриту, або у закриту осушувальну мережу в будь-який період вегетації.

2. Осушувально-зволожувальні системи із подачею води у витоки колекторів із розподільників. У таких системах використовуються шлюзи-регулятори, які розміщують у гирлах та витоках колекторів. Для підвищення надійності, цих систем витоки дрен, для подачі в них води, з'єднуються із закритими зволожувачами [23], а для підвищення оперативності керування водним режимом колектори та зволожувачі об'єднують у окремі групи і зволоження здійснюється по групам дрен [16]. Подача води на систему здійснюється за допомогою водопровідних каналів із мінімальними похилами.

3. Суміщені осушувально-зволожувальні системи. В цих системах закриті

колектори осушувальної мережі використовують в якості розподільників для подачі води до дощувальних установок, які забирають воду із відкритих оглядових колодязів. Суміщені ОЗС можуть працювати, як комплексні, основний режим – підгрунтове зволоження по дренах, тимчасовий режим – дощування невеликими нормами.

4. Осушувально-зволожувальні системи водооборотного типу. Особливістю цих систем є можливість повторного використання дренажних та скидних вод, що попереджає забруднення водоприймачів. Зазвичай такі системи мають два ставки накопичувачі: один у гирловій частині магістрального каналу, для збору дренажного стоку, а другий – у верхній частині системи, куди зібраний дренажний стік із нижнього ставка, подається насосною станцією по напірному трубопроводі. Нижній ставок будується у найбільш пониженій частині системи, а верхній, на підвищенні. Деколи для зволоження використовують воду із інших джерел. При відсутності відповідних місць для створення верхнього ставка-накопичувача, може використовуватися схема із одним ставком, подаючи воду безпосередньо у зволожувальний канал.

5. Осушувально-зволожувальні системи із частими водооборотами всередині поля. Ці системи являють собою дещо змінені конструкції суміщених систем. Колодязі на колекторах у цих системах виконують функції підземних ставків-накопичувачів. Розміри колодязів і місця їх розміщення залежать від параметрів використовуваних дощувальних машин і потреб у зрошенні. У весняний період система працює в режимі акумулювання стоку, а у літній, в режимі використання акумульованої води на полив.

Крім розглянутих вище ОЗС розроблено і використовується ряд нових конструкцій систем двостороннього регулювання водного режиму ґрунту [13; 77; 78; 80], вони покращують регулювання, а також зменшують витрати води на зволоження, економлять добрива та сприяють підвищенню врожайності сільськогосподарських культур. Крім того, застосування нових технологій дозволяє збільшити довжини дрен до 1200 м і знизити необхідні напори над устями дрен при зволоженні до 0.4 м, в свою чергу це дозволяє збільшити

міжканальну площу та підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва [78]. Короткий огляд існуючих ОЗС встановив, що використання зволоження сприяє значному підвищенню врожайності, до 40% [11], забезпечує збереження структури ґрунту, запобігає виникненню ерозії та ущільнення, утворення ґрунтової корки, покращує аерацію та тепловий режим [8]. Але разом з тим, ОЗС мають ряд недоліків, що знижують ефективність їх експлуатації. Вони мають значну інерційність, що впливає на оперативність регулювання водно-повітряного режиму ґрунту, особливо на полях з великими розмірами, у цих випадках зволожувана територія повинна мати рівнинний добре спланований рельєф. Крім того, перехід від колективних господарств до дрібногосподарських з полями 15-100 га ускладнює регулювання РГВ та не дозволяє забезпечувати дотримання різних норм осушення для різних сівозмін одночасно [8]. Враховуючи ці недоліки, потрібно переходити до систем, які б забезпечували порівняно швидке та точне регулювання водного режиму в автоматичному та автономному режимах роботи, що можливо лише з використанням комплексної автоматизації водорегулювання.

Нормальний розвиток рослин забезпечується при оптимальному співвідношенні всіх життєво необхідних факторів: світла, тепла, повітря, вологи і поживних речовин. Всі ці фактори тісно між собою взаємопов'язані і зміна одного з них викликає зміну інших [80], але найбільш суттєвий вплив на всі фактори має вологість ґрунту кореневмісного шару. Підтримання її в оптимальних для розвитку рослин межах забезпечується за рахунок проведення комплексу експлуатаційних заходів по регулюванню водного режиму, суть яких полягає в тому, що в періоди перезволоження кореневмісного шару своєчасно відвести надлишкову воду, а в період недостачі, подати її на зволоження в необхідній кількості [79]. Регулювання вологозапасів ґрунту та інших факторів, яких залежить врожайність сільськогосподарських культур найкраще здійснювати за допомогою зміни РГВ.

Перші наукові обґрунтування методів зволоження сільськогосподарських культур були зроблені А.Н. Костяковим [17], в подальшому над їх розробкою

працювали Б.С. Маслов, А.М. Янголь, Ш.І. Брусилівський, П.І. Коваленко, О.В. Скрипник, Г.С. Потоцький, М.О. Лазарчук, А.М. Рокочинський та ін. [13; 19; 23; 24; 28; 80; 91; 92].

На осушуваних землях виділяють такі *методи зволоження*: поверхнєве, підґрунтове зволоження та дощування. При поверхневому зволоженні вода подається по поверхні ґрунту і поступає до коренів шляхом фільтрації, найчастіше цей метод застосовується в слабопроникних ґрунтах. При підґрунтовому зволоженні створюються умови, які забезпечують короткочасне повне насичення кореневмісного шару ґрунту за рахунок підйому РГВ до оптимального значення, або шляхом капілярного підживлення від ґрунтових вод. Регулювання РГВ відбувається за рахунок інфільтрації води із відкритих каналів, або закритих дрен, він придатний для застосування на добрепроникних ґрунтах. При дощуванні воду в ґрунт подають розпилюючи її над поверхнею землі спеціальними апаратами, він застосовується при зволоженні овочевих та кормових культур, садів, культурних пасовищ, а також на ділянках із слабопроникними ґрунтами з розвиненим рельєфом [75].

Із розглянутих вище методів на ОЗС найбільше використовується підґрунтове зволоження, у порівнянні із дощуванням і поверхневим зволоженням воно дешевше, потребує менше затрат енергії та матеріалів, забезпечує підтримання відповідної структури ґрунту, не призводить до ерозії, сприяє аерації і життєдіяльності ґрунтової мікрофлори, покращує тепловий режим, залишає більш сухим верхній шар, зменшує захворюваність рослин, дозволяє утримувати внесені добрива, не пошкоджує посіви поливною технікою, покращує умови для механічної обробки, дозволяє автоматизувати водоподачу і розподіл вологи по полях та управління водним режимом ґрунту, відрізняється простотою конструктивної реалізації та експлуатації. Метод підґрунтового зволоження використовується переважно на об'єктах із ґрунтово-атмосферним живленням, при коефіцієнті фільтрації ґрунту не менше 0.5 м/добу, на землях із невеликими похилами та з наявним джерелом подачі додаткової води. Разом з тим підґрунтове зволоження має ряд недоліків:

- висока інерційність, у випадку випадіння інтенсивних дощів на зволожувальну територію для зниження РГВ до норми осушення потрібно від 3 до 12 діб і більше;

- через недостатню зволоженість верхнього шару ґрунту цей спосіб обмежений у використанні для вирощування розсадних культур;

- замулення труб зволожувачів та їх закупорка коріннями рослин [17].

Способи зволоження – це технологічні прийоми або засоби, за допомогою, яких реалізується той чи інший метод зволоження в конкретних умовах [71]. Вони визначають характер регулюючої зволожувальної мережі і конструкцію ОЗС. Вибір способу зволоження залежить від агроекономічних вимог, площі і конфігурації окремих полів зволожувальної ділянки, рельєфу, похилу місцевості, водно-фізичних властивостей ґрунту, видів вирощуваних культур тощо.

При підґрунтовому зволоженні широко використовується шлюзування поодиноких відкритих каналів, систематичної мережі відкритих каналів, каналів з тимчасовими зволожувачами, каналів з кротовим дренажем, закритого матеріального дренажу та у комбінуванні різних схем зволоження. У попереджувальному шлюзуванні при досягненні необхідної норми осушення шлюзами перекривається стік із осушувальної системи, уповільнюючи зниження РГВ. При зволожувальному шлюзуванні воду для зволоження спрямовують проти похилу як відкритої, так і закритої регулюючої мережі. Подаючи воду через гирло, зменшується потреба у регулювальних спорудах при невеликих похилах. Якщо умови рельєфу неприйнятні, то застосовують подачу води у витоки [19].

При застосуванні зволожувального шлюзування воду в систему подають одним із наступних способів [24]:

- у гирло колекторів-зволожувачів із провідних осушувальних каналів;
- у гирло колекторів-зволожувачів із каналів розподільників;
- у витоки колекторів-зволожувачів із напірного трубопроводу;
- у спеціальні зволожувальні трубопроводи із розподільних каналів.

При цьому основною задачею є створення оптимального режиму роботи мережі відкритих каналів та закритих дрен як при зволоженні, так і при осушенні. Головною ланкою автоматизації регулювання водного режиму є автоматична підтримка заданого рівня в мережі каналів, що, в свою чергу, забезпечить необхідну вологість у кореневмісному шарі ґрунту. Крім того, при розробці та впровадженні засобів автоматизації необхідно враховувати дані про статичні і динамічні характеристики об'єктів. Ці показники впливають на швидкодію систем регулювання рівня води в каналах та на перехідні процеси в ґрунтах, які між собою суттєво відрізняються.

Автоматизація водорозподілу та регулювання РГВ, а відповідно і підтримання необхідної вологості ґрунтів з використанням засобів автоматизації здійснюється за допомогою наступних технологічних операцій: своєчасне припинення осушувальної дії системи; додаткове зволоження осушуваних земель; припинення додаткового зволоження; осушення при піднятті РГВ вище розрахункового внаслідок випадіння значних опадів.

Таким чином, ОЗС з підґрунтовим зволоженням мають значну інерційність, що впливає на оперативність керування водно-повітряним режимом ґрунту, тому точне та порівняно швидке керування вологістю кореневмісного шару ґрунту можливо лише з використанням комплексної автоматизації водорегулювання.

1.2 Аналіз існуючих методів та технічних засобів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на системах з підґрунтовим зволоженням

1.2.1 Методи та технічні засоби контролю вологозабезпеченості сільськогосподарських культур

Інтегруючою характеристикою водного режиму ґрунту (на фіксований момент часу) є *ґрунтова вологість* (вологозапаси) [69]. Вологість – вміст

вологи в заданому ґрунтовому шарі, що виражене у відносних одиницях або у відсотках від маси або об'єму ґрунту [7].

Існують різні підходи до вимірювання вологості ґрунту. Одним із самих точних вважається підхід, коли необхідну інформацію отримують у результаті систематичного слідкування в часі за фактичними вологозапасами ґрунтів (інструментальні методи). Другий підхід ґрунтується на отриманні необхідної інформації у результаті розрахункового прогнозування зміни влогозапасів відносно вихідних даних про вологість в залежності від погодних умов, або розрахункового прогнозування у поєднанні з прямим контролем вологозапасів (розрахункові методи).

Поточна інформація про вологозапаси кореневого шару ґрунту в автоматизованих системах керування (АСК) вологозабезпеченням необхідна для прийняття оперативних рішень при реалізації екологічно чистих технологій вирощування сільськогосподарських культур з метою одержання максимального врожаю. Розрахункові методи з використанням математичних моделей [14] не завжди дозволяють отримати достовірні результати про зміну вологості ґрунту та зони аерації, а використання найбільш доступних точкових давачів (воломірів) – потребує розробки методик їх застосування.

Слід зазначити, що проблема вимірювання вологості ґрунту ще повністю не вирішена у зв'язку із складністю об'єкта вимірювання, не дивлячись на велику кількість інструментальних методів. Постійно виникає необхідність у виключенні впливу неінформативних параметрів ґрунту, які міняються в просторі і в часі (сольовий і механічний склад, температура, щільність та інші), що призводить до створення або дуже дорогих, або дуже складних приладів. Тому для контролю за вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур в системах автоматизації на ОЗС доцільно використовувати вологоміри, які розроблені на основі тензіометричного методу вимірювання. Тензіометри використовуються в діапазоні від повної вологоємності до 0.7...0.8 найменшої вологоємності, вони можуть бути використані в якості давачів в системах контролю та управління на ОЗС. Однак необхідне допрацювання існуючих

схем тензіометричних вологомірів для покращення експлуатаційних характеристик та надійності роботи. Потрібно зазначити, що найбільш перспективною оцінкою вологозабезпеченості рослин, з точки зору практичної реалізації, є одержання інформації про вологозапаси кореневого шару ґрунту шляхом розробки інформаційної системи контролю вологості ґрунту [26].

1.2.2 Методи та технічні засоби автоматизованого водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах

Розроблені в різні часи автоматизовані меліоративні системи покликані створювати оптимальні умови для росту сільськогосподарських культур завдяки ефективному і точному підтримувані регульованих параметрів на заданих значеннях. Технологія підґрунтового зволоження визначається типом водного живлення і ступенем водопроникності осушуваних земель. Для зволоження ґрунтів, як правило, використовують попереджувальне та зволожувальне шлюзування, яке, у свою чергу, поділяється на неперервне (довготривалий підпір) і періодичне (циклічне) [70].

Відразу після проходження весняного паводку використовують попереджувальне шлюзування, для цього підпірні споруди на каналах закривають, внаслідок чого здійснюється затримка післяпаводкового стоку в каналах меліоративної системи. Для цього використовуються гідрорегулятори двосторонньої дії або дренажного стоку, які монтуються у коробчасті затвори шлюзів-регуляторів. На закритій регулюючій мережі здійснюється затримка дренажного стоку за допомогою гідрорегуляторів дренажного стоку, що монтуються у колодязях по довжині колекторів або безпосередньо на гирлових спорудах. Ці пристрої налаштовують на рівень, який відповідає нормі осушення для відповідної сівозміни та періоду вегетації. Таким чином забезпечується використання продуктивної вологи для поповнення вологозапасів сільськогосподарських угідь. Унаслідок використання попереджувального шлюзування зниження РГВ значно сповільнюється, що запобігає швидкому зменшенню вологозапасів ґрунтів. Ці заходи дозволяють повністю

задовольнити потреби у воді в середні по вологозабезпеченості вегетаційні періоди, а у посушливі зменшити кількість води при зволоженні [31; 70].

Але попереджувальне шлюзування не повною мірою забезпечує необхідні рівні води у каналах по всій довжині особливо в посушливі періоди. У таких випадках проводять зволожувальне шлюзування із подачею додаткової води з акумулюючих ємностей у витоки колекторів через спеціальні зволожувальні канали або колектори. При використанні проточних колекторів гідрорегулятори водоподачі працюють в режимі підтримки РГВ на нормі осушення, а гідрорегулятори дренажного стоку продовжують працювати в режимі підпору, регулюючи стік. При зволоженні тупикового дренажу додаткову воду подають по осушувальних каналах проти похилу, а регулятори двосторонньої дії автоматично перемикаються у режим водоподачі. У випадку випадання опадів зволоження необхідно припинити і перевести систему в режим осушення, особливо при випаданні затяжних зливових дощів. Таким чином, використання автоматичних гідрорегуляторів при попереджувальному та зволожувальному шлюзуванні дає змогу підвищити ефективність водорегулювання та раціонально використовувати воду при зволоженні [31; 85].

На території, де досить часто відбувається чергування посушливих та вологих періодів, використання неперервного зволоження не забезпечує утримування РГВ на нормі осушення протягом всього періоду зволоження. Як спеціальний вид підгрунтового зволоження застосовується періодичний (циклічний) режим, який дає змогу врахувати вище вказаний недолік і підвищити оперативність водорегулювання. Швидке підняття РГВ над дренами дає змогу прискорити процес розтікання води у міждренні і відповідно його підняття по всьому зволожувальному масиву. Після закінчення допустимого терміну перезволоження (2-3 доби) РГВ знижують до норми осушення і утримують на такому рівні до початку нового циклу [70].

У разі випадання зливових затяжних дощів, під час будь якого циклу гідрорегулятори повинні автоматично перемикатися в режим осушення, а цикл

зволоження повторюватися з початку. Для проведення кожного наступного циклу необхідно забезпечити підтримку напору в дренах на рівні $h_d=0.5...0.7$ м. Розроблені гідравлічні регулятори за рахунок гнучкого механізму зміни уставки поплавків дають змогу успішно реалізувати вищеописані способи регулювання на проточних і тупикових гілках ОЗС [31; 85].

Використання такого підходу потребує комплексного вирішення питань регулювання водно-повітряного режиму [85], це обумовлено потребою підвищення ефективності водорегулювання за рахунок більш високої точності та швидкодії з урахуванням різноманітних збурюючих факторів. Для цього потрібно використовувати прості та надійні засоби гідравлічної автоматизації, які б ефективно здійснювали процес водорегулювання упродовж всього періоду вегетації. Вони повинні мати широкі межі застосування і, разом з тим, бути уніфікованими та конструктивно простими і не потребувати переобладнання колодязів та мережі.

Існуючі гідравлічні регулятори для впливу регулюючих органів на об'єкт керування використовують частину його енергії, що суттєво впливає на їх точність і швидкодію. Вченими Пастушенко В.Й. та Наумчуком О.М. [31; 33] розроблені також гідрорегулятори, які використовують енергію регульованого об'єкта, яка перетворюється і підсилюється, що збільшує точність (0.007...0.02 м) та швидкодію регуляторів. За способом впливу на систему тільки гідрорегулятори АРУ (Львівдипроводгосп) та розробки у працях [31; 33] можуть застосовуватися для регулювання рівнів як відкритої, так і закритої мережі. Крім того, гідрорегулятори водоподачі, дренажного стоку і двосторонньої дії можуть застосовуватися для автоматизації тупикового і проточного дренажу, що забезпечується можливістю встановлення у колодязях, коробах та на вихідних оголовках колекторів.

Конструктивні особливості уніфікованих клиноподібних запірних органів з гумовою робочою камерою дозволяють здійснювати ефективне регулювання без переобладнання водовипускних труб колодязів. Він має кращі показники, щодо замулення та іржавіння матеріалів, оскільки може бути виготовлений з

пластмаси [31; 33]. Для врахування опадів у [31; 33] запропоновано також використовувати опадомір, що в автоматичному режимі перемикає гідрорегулятор з режиму зволоження на режим осушення для уникнення надлишкового перезволоження верхнього кореневмісного шару ґрунту.

Засоби гідравлічної автоматизації являють собою різного типу регулятори, які використовують енергію перепадів або напорів для автоматичної стабілізації рівнів, витрат, перепадів, тисків. До засобів гідравлічної автоматизації також відносять конструкції споруд, які здійснюють регулювання без застосування будь-яких автоматичних регуляторів [12].

Всі засоби гідравлічної автоматизації поділяються на [24; 31]:

- регулятори рівнів у каналах відкритої мережі (верхнього, нижнього б'єфів, змішаного типу, гідравлічних перепадів, водозливні пороги і затвори, водозливні сифони);

- регулятори витрат у відкритій мережі (регулятори витрат, пропорційні подільники);

- регулятори напорів у закритій мережі (регулятори напорів у трубопроводах, рівнів на водовипусках у закриту мережу, рівнів ґрунтових вод);

- автоматичні засувки на закритій мережі (засувки та клапани для стаціонарних систем, для стабілізації напорів і аварійного відключення).

Відомі на сьогодні пристрої гідравлічної автоматизації дозволяють підтримувати задані значення рівня із похибкою 5...6%, більшість цих регуляторів прямої дії і регулювання відбувається тільки на одній встановленій відмітці. При значних перепадах рівнів між верхнім і нижнім б'єфами застосування цих пристроїв ускладнюється [12].

Крім того, всі регулятори прямої дії побудовані за принципом зрівноваження моментів чи проекції сил від ваги конструкції і гідростатичного або гідродинамічного тиску. Вони працюють переважно без підтоплення. На рис. 1.1 представлена, розроблена Пастушенко В.Й. та Наумчуком О.М. [31] класифікація існуючих гідравлічних засобів регулювання, що застосовуються

на сучасних ОЗС.

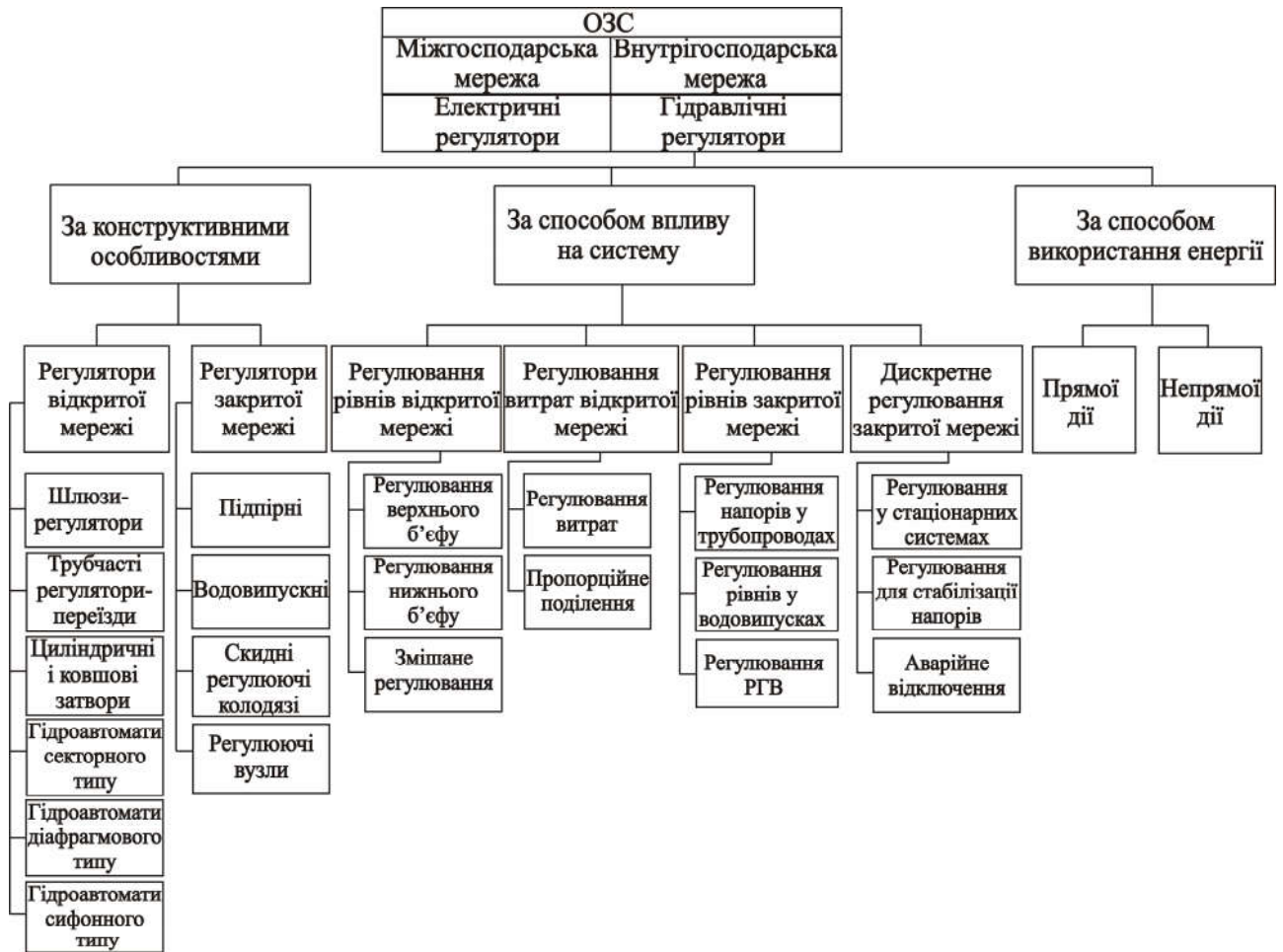
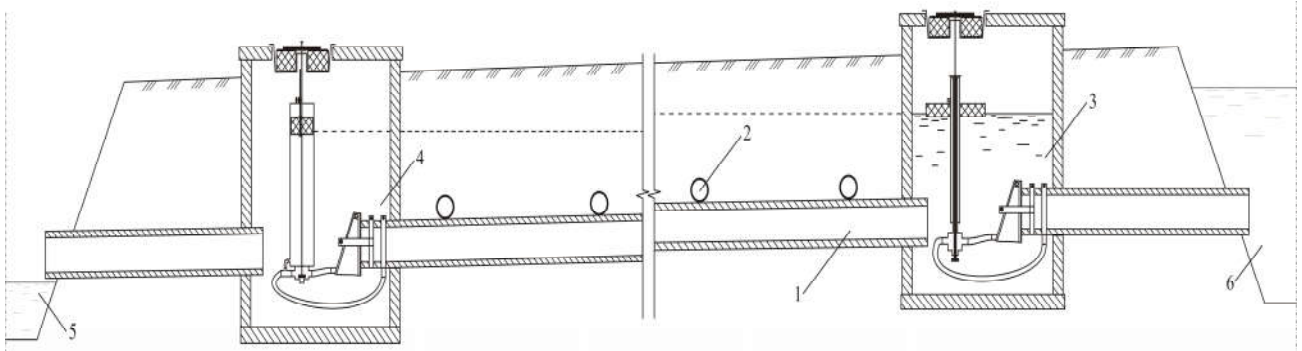
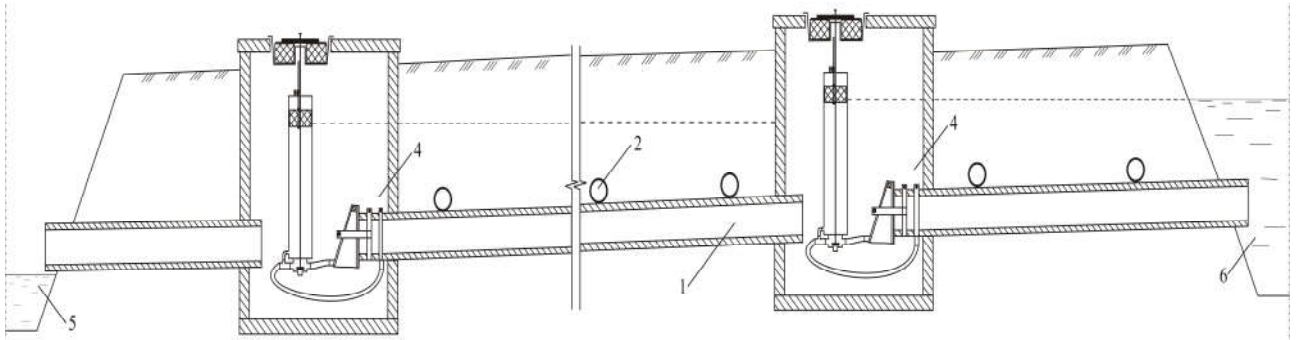


Рисунок 1.1 – Класифікація гідравлічних регуляторів

Для автоматизованого водорегулювання і забезпечення нормальної водоподачі із зволожувальних каналів, на масивах з похилом не більше $i=0.003$ застосовують схему регулювання за нижнім б'єфом (рис. 1.2, а), а схему регулювання за верхнім б'єфом застосовують на масивах із похилом $i=0.002...0.005$ на ґрунтах різного гранулометричного складу (рис. 1.2, б). Система регулювання РГВ (рис.1.2) складається з таких елементів: 1 – колектор; 2 – дренаж; 3 – регулятор водоподачі; 4 – регулятор дренажного стоку, 5 – осушувальний канал; 6 – зволожувальний канал. На системах з проточною мережею регулювання встановлюють гідрорегулятори водоподачі, які забезпечують подачу води на зволоження та дренажного стоку, що регулюють стік води з колекторів за допомогою підпору [31].



а)



б)

Рисунок 1.2 – Схеми регулювання РГВ на проточній мережі з використанням гідрорегуляторів водоподачі та дренажного стоку: а) регулювання за нижнім б'єфом; б) регулювання за верхнім б'єфом

Розроблені Пастушенко В.Й. та Наумчуком О.М. в [31; 33] гідрорегулятори складаються із запірному органу клиновидного типу з еластичною робочою камерою, чутливого елемента поплавково-клапанного типу та опадоміра. Розглянемо принцип роботи гідрорегуляторів дренажного стоку (рис. 1.3), водоподачі (рис. 1.4) і двосторонніх гідрорегуляторів (рис. 1.5). Гідрорегулятор дренажного стоку (рис. 1.3, а) складається з запірному органу 1, який виготовлений з прогумованої тканини та закріплений за допомогою кронштейна 2 на водовипускній трубі. Робоча камера запірному органу шлангом 3 з'єднана з клапанною коробкою. Клапан 5 з'єднаний тягою 6 з поплавком 8, який знаходиться в трубі 7. За допомогою настроювального механізму 9 поплавком 8 встановлюється на заданий рівень верхнього б'єфу. Шланг 4 сполучає робочу камеру запірному органу з верхнім б'єфом. В кришці колодязя вмонтовано опадомір 10, в якому розміщений поплавок 11,

навантажений вантажем 12. У звичайному режимі (підпір) запірний орган 1 закритий. Коли РГВ піднімається, поплавок 8 спливає і через тягу 6 відкриває клапан 5, вода із робочої камери 1 зливається і отвір водовипускної труби відкривається. Після зниження РГВ відбувається зворотний процес [31; 33].

Для відкриття водовипускної труби при випаданні критичної норми опадів у кришці колодязя встановлено опадомір 10, після перевищення заданого рівня води у камері опадоміра поплавок 11 спливає і через тягу 6 відкриває клапан 5. При цьому вода зливається із робочої камери запірного органу і водовипускна труба відкривається. Регулювання спрацювання опадоміра при встановленій кількості опадів здійснюється за допомогою вантажу 12. При випаровуванні води з камери опадоміра клапан 5 повертається у вихідне положення [31; 33]. Для зменшення витрат на будівництво колодязя передбачена можливість монтажу гідрорегулятора безпосередньо на вихідних оголовках колекторів у каналі (рис. 1.3, б). Для цього труба 7 закріплюється за допомогою кріплень 13, а зверху встановлюється опадомір [31; 33].

Гідрорегулятор водоподачі (рис. 1.4) складається з запірного органу 1, який закріплений на водовипускній трубі за допомогою кронштейнів 3 і 2. Шланг 4 з'єднує верхній і нижній б'єфи гідрорегулятора. Клапанна коробка обладнана клапаном 6, що відкривається, який закріплений на трубі 7 в середині, якої знаходиться тяга 8. На стояк 9 надіта труба 10, яка служить для встановлення поплавка 11 на заданий рівень регулювання. У верхній частині труби 10 до трубки 7 і тяги 8 прикріплений упор 12. В кришці колодязя вмонтовано опадомір 13, поплавок 14 якого з'єднаний із тягою 8. Регулювання спливання поплавка 14 при заданій кількості опадів відбувається за допомогою вантажу 15 [31; 33]. При регулюванні водоподачі рівень води в каналі вищий від уставки поплавка 11, тому клапан 6 закритий і запірний орган 1 перекриває отвір водовипускної труби. Коли рівень води в колодязі знижується, поплавок 11 опускається, звільняючи упор 12, що спричиняє відкриття клапана 6. Рівновага системи порушується, вода витискається з порожнини запірного органу, що призводить до відкриття водовипускної труби.

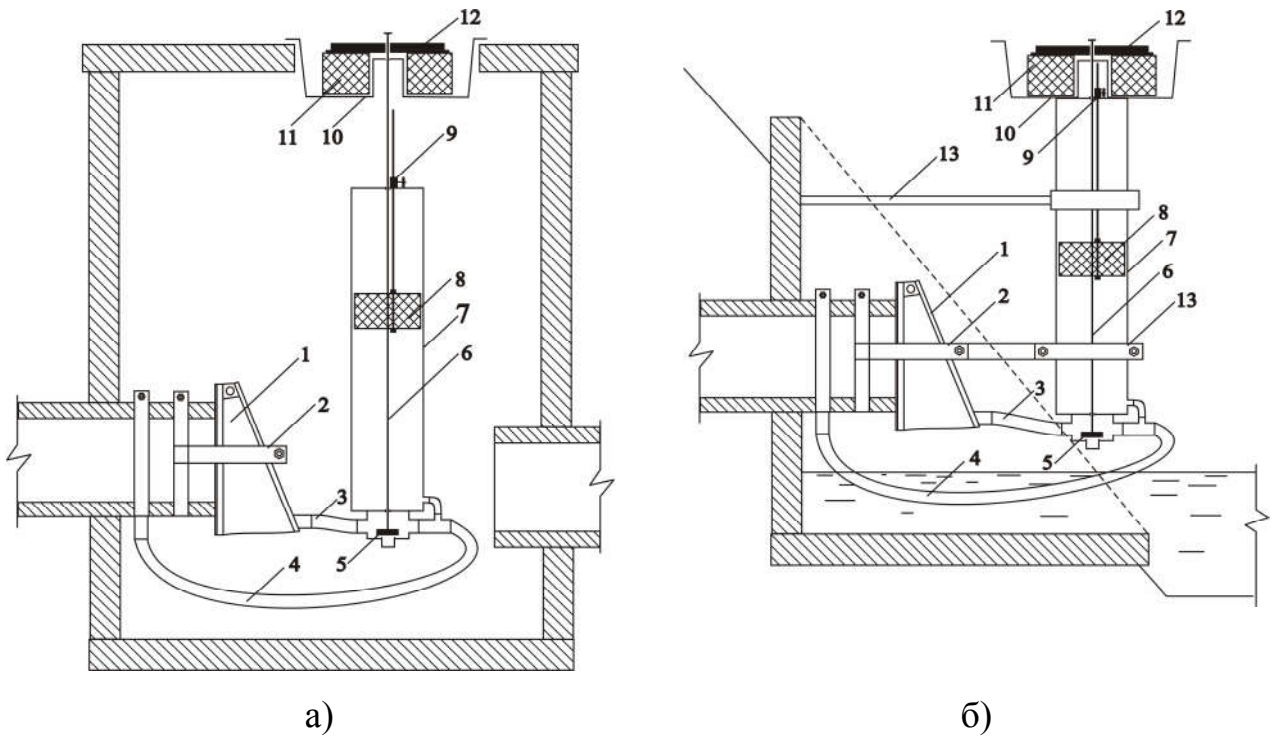


Рисунок 1.3 – Гідралічний регулятор дренажного стоку:

а) у колодязі; б) на вихідному оголовку колектора (без колодязя)

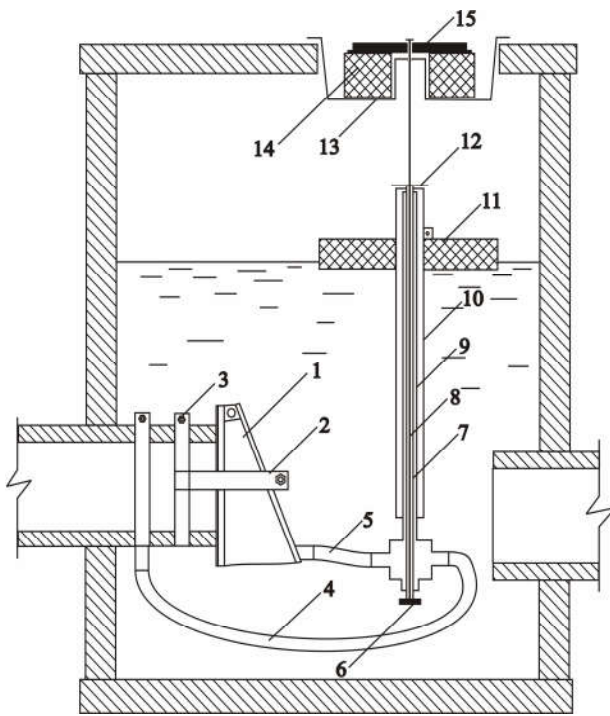


Рисунок – 1.4 Гідралічний регулятор водоподачі

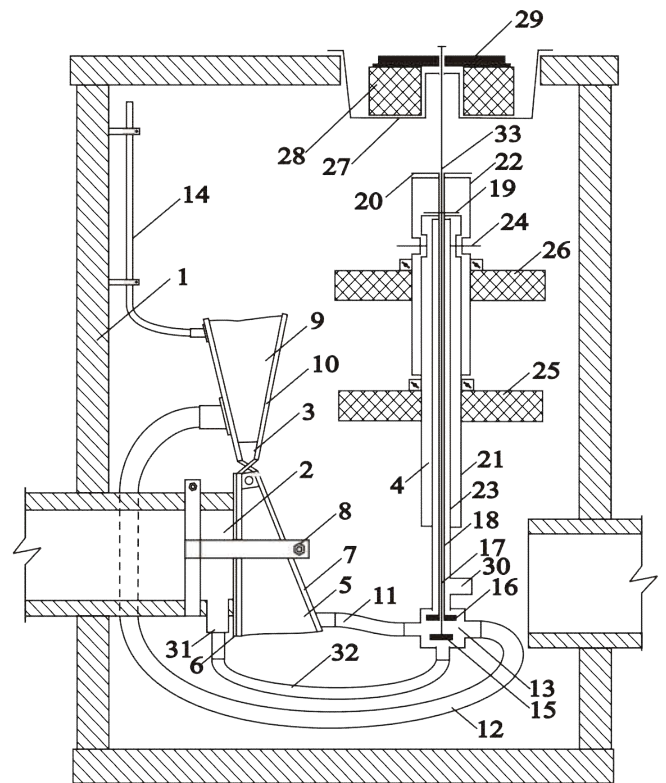


Рисунок 1.5 – Гідрорегулятор двосторонньої дії

Цей режим діє до наповнення колодязя, після чого процес повторюється знову. При випаданні встановленої величини критичних опадів спрацьовує опадомір 13 [31; 33].

На масивах де неможливо забезпечити будівництво проточної мережі будують тупикові гілки, на які встановлюються регулятори двосторонньої дії. Вони забезпечують регулювання рівня у двох режимах (зволоження і осушення), а також здійснюють автоматичне перемикання між ними (рис. 1.6) [31; 33]. Схема регулювання РГВ (рис.1.6) складається з наступних елементів: 1 – колектор; 2 – дренаж; 3 – гідрорегулятор двосторонньої дії; 4 – осушувально-зволожувальний канал [31; 33].

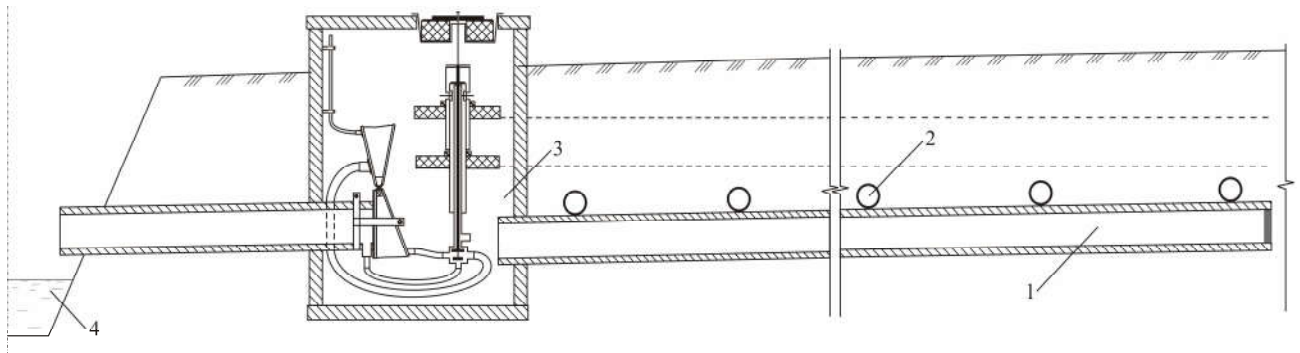


Рисунок 1.6 – Схема регулювання РГВ на тупиковій мережі з використанням гідрорегулятора двосторонньої дії

На рис. 1.5 зображена схема гідрорегулятора двосторонньої дії, який встановлюється в регулюючому колодязі 1 на водовипускній трубі 2, на якій змонтовано запірний орган 3 з підсилюючою камерою 9. Чутливий елемент 4 складається з двоклапанної коробки 13, вертикального стояка 23, телескопічних трубок 21 і 22, двох поплавків 25 і 26, та опадоміра 28 [31; 33]. У початковий період вегетації та в післяпагодкові періоди гідрорегулятор працює в режимі затримки дренажного стоку. Рівень води в каналі при цьому нижчий відмітки уставки поплавка 25. Клапан 15 під дією власної ваги перекриває патрубков шланга 32, а клапан 16 відкритий. При наявності дренажного стоку вода надходить через патрубок 30 в порожнину камери 5, яка робочою пластиною 6

прикриває водовипускную трубу 2. По мірі підвищення рівня в колодязі, вода притискає її до водовипускної труби та через шланг 12 заходить у порожнину підсилювальної камери 9, герметизуючи систему. При перевищенні регульованого рівня уставки поплавка 25 він спливає, піднімає трубку 21 і упор 19, відкриваючи клапан 15. Відкриття клапана 15 призводить до злиття води з камер 5 та 9, але діаметр шланга 12 більший за діаметр шланга 11, тому витікання води з камери 9 проходить значно швидше ніж із камери 5. Це призводить до виникнення різниці зовнішнього тиску води в колодязі та внутрішнього в камері 9 і утворюється момент, який прагне відкрити запірний орган 3. Внаслідок цього відбувається переміщення пластин 10 і 6 і відкриття водовипускної труби. При зниженні рівня в колодязі клапан 15 закривається і процес повторюється у зворотному порядку. Таким чином в колодязі підтримується рівень, який заданий відміткою уставки поплавка 25 [31; 33].

У режимі шлюзування в каналі створюється напір вищий відмітки поплавка 26. Оскільки клапан 16 при цьому відкритий, то під дією гідростатичного тиску з боку каналу вода витискається із порожнини камер 5 та 9, внаслідок цього водовипускна труба 2 відкривається. Рівень в колодязі продовжує зростати, поплавок 25 спливає і відкриває клапан 15, але оскільки клапан 16 відкритий, то водовипускна труби 2 залишається відкритою. Це зумовлено тим, що в даному режимі гідравлічний опір каналу - місцевий гідравлічний опір 31 і шланга 32, є більшим опору патрубку 30. При досягненні рівнем відмітки поплавка 26 останній спливає, піднімає трубу 22, упор 20 і клапан 16 закривається, це призводить до заповнення камер 5 та 9 і закриття водовипускної труби 2. При зниженні рівня поплавок 26 опускається і клапан 16 відкривається, вода витискається із камер 5 та 9 і водовипускна труба відкривається. Таким чином забезпечується підтримка заданого значення рівня води в колодязі в режимі зволоження [31; 33].

При роботі гідрорегулятора в обох режимах його конструкція забезпечує відкриття водовипускної труби при випаданні критичної норми опадів. При цьому поплавок 28 опадоміра 27 спливає і тяга 33 піднімає упори 19 і 20,

забезпечуючи відкриття клапана 15 і закриття 16. Внаслідок цього відбувається злиття води з камери 5 та 9 і водовипускна труба відкривається. В режимі дренажного стоку забезпечується зниження РГВ за рахунок стоку води у канал, в режимі шлюзування відбуватиметься аналогічний процес, але рівень в каналі вищий рівня в колодязі, тому для зниження РГВ необхідно зупинити зволоження і знизити рівень в каналі. Закриття водовипускної труби відбувається тільки після випаровування води із камери опадоміра [31; 33].

Для збільшення продуктивності роботи осушувально-зволожувальної мережі іноді проектують системи з окремо розташованою осушувальною та зволожувальною частиною [71]. Такі системи дозволяють ефективніше проводити як зволоження, так і осушення. В них вода для зволоження подається з підвідного каналу 6 через колодязі-регулятори (встановлені у верхній частині дренажної системи) у закриті зволожувальні колектори, а звідти в дрени, які виконують функцію осушувачів та зволожувачів. При цьому у колекторах 1 створюється підпір води за допомогою гідравлічних регуляторів дренажного стоку 4, які встановлені в нижніх колодязях (рис. 1.7, а). У періоди з надлишковою вологістю ґрунту верхні колодязі-регулятори із гідрорегуляторами водоподачі 3 перекриваються, а нижні із гідрорегуляторами дренажного стоку відкриваються, і вода із мережі дрен 2 вільно витікає у відкриті канали 5 (рис. 1.7, б) [31; 33].

Сучасні ОЗС потребують комплексного підходу до автоматизації, тому існує потреба у забезпеченні автоматичними засобами всього ланцюга водорегулювання від головної водозабірної споруди до споруд на відкритій і закритій мережі. А використання однотипних уніфікованих пристроїв, значно покращить експлуатаційні показники, знизить витрати та підвищить ефективність регулювання водно-повітряного режиму ґрунту у цілому. У роботах [31; 33] запропоноване використання гідрорегуляторів закритої мережі для регулювання рівня води у відкритих каналах. Для цього на гідротехнічних спорудах використовуються реконструйовані коробчаті затвори ЗК-1,3×1,0 та ЗК-1,8×1,0 і шлюзи-регулятори типу РТК-80 і РТК-100. На рис. 1.8 наведено

схему встановлення гідрорегулятора двосторонньої дії у реконструйований коробчатий затвор. Схема складається із наступних елементів: 1 - гідрорегулятор двосторонньої дії; 2 - коробчатий затвор; 3 - водозлив; 4 - залізобетонна стінка; 5 - підйомник; 6 - залізобетонна труба. Запірний орган гідрорегулятора закріплюється на передній стінці затвора на попередньо встановлену у вирізаний отвір трубу. Чутливий орган та поплавковий опадомір закріплюються за допомогою кронштейнів. Для збільшення пропускної здатності через регульовальну споруду можливе встановлення двох гідрорегуляторів у один затвор [31; 33].

Всі гідрорегулятори мають засоби налаштування, які дають змогу легко змінювати уставки регульованих рівнів за допомогою зміни положення поплавків, що дає змогу здійснювати оперативне регулювання РГВ, а також задавати регульовані рівні у відкритих каналах. Встановлення гідрорегуляторів у регульовальні колодязі здійснюється за допомогою кронштейнів або розтяжок і не потребує їх переобладнання, а монтаж у коробчаті затвори шлюзів-регуляторів технологічно нескладний і може бути виконаний у експлуатаційній установі [31; 33]. Слід зазначити, що застосування гідравлічної автоматизації на ОЗС дозволяє підвищити якість будівництва і технічний рівень експлуатації меліоративних систем. Конструктивно гідрорегулятори мають невелику кількість елементів, що поліпшує їх надійність, а також при їх виготовленні використовується мінімальна кількість металевих деталей. Крім того, всі вони обладнані однаковими уніфікованими запірними органами, що дає можливість зменшити затрати на їх виготовлення та експлуатацію. У міжвегетаційний період або при потребі очистки гідротехнічних споруд гідрорегулятори демонтуються і зберігаються у складських приміщеннях [31; 33].

Однак залишаються відкритими питання оперативного врахування дії збурень на об'єкт керування. Адже на даний час за допомогою опадоміра враховуються лише опади, які є по факту. Крім того, положення поплавка у гідрорегуляторі, який визначає уставку РГВ, встановлює людина-оператор.

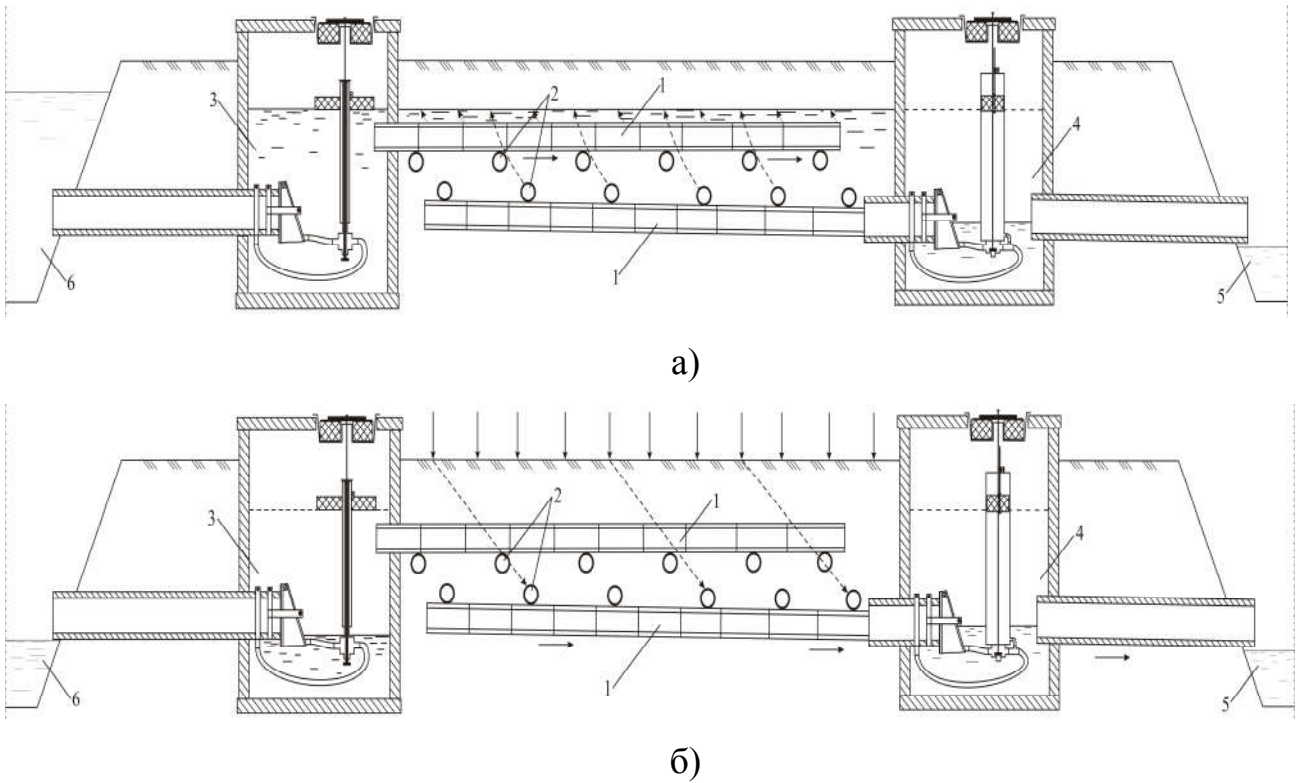


Рисунок 1.7 – Схема колекторно-дренажної мережі із окремим розміщенням дрен із встановленими гідро регуляторами:
а) режим зволоження; б) режим осушення

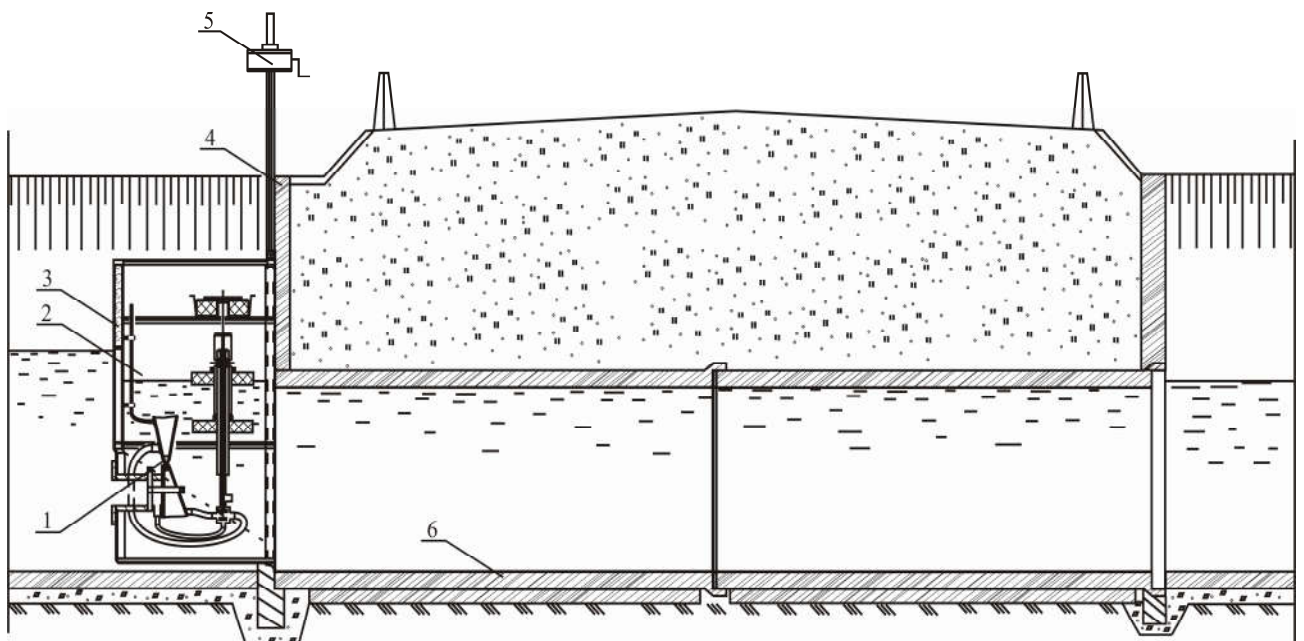


Рисунок 1.8 – Шлюз регулятор трубчастий з коробчатим затвором із встановленим гідрорегулятором двосторонньої дії

Враховуючи, що ОЗС з підґрунтовим зволоженням є дуже інерційними, а перехідний процес у них може тривати декілька діб, вище названі фактори не дозволяють забезпечити потрібну точність та оперативність керування. Крім того, крім опадів, існують і інші метеорологічні збурення, які впливають на вологість ґрунту, наприклад, температура та вологість повітря. Для підвищення точності та оперативності керування необхідно вдосконалити конструкцію існуючих гідрорегуляторів, забезпечивши зміну уставки РГВ не тільки у ручному, а й в автоматичному та дистанційному режимах; розробити структуру автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, де б усі її елементи були з'єднані у єдину інформаційну систему; забезпечити автоматичний розрахунок завдання РГВ, враховуючи різноманітні метеорологічні збурення та їх прогноз; розробити інтерфейс взаємодії оператора із системою керування. Таким чином, актуальною проблемою є розробка нових методів керування вологозабезпеченістю, які здатні забезпечити необхідну точність та оперативність керування на всіх фазах розвитку сільськогосподарських культур з врахуванням дії змінних збурень з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів.

1.3 Використання методів нечіткої логіки та нейронних мереж для керування об'єктами та технологічними процесами в умовах дії збурень

1.3.1 Використання нечіткої логіки у меліорації, гідрології, керуванні водними ресурсами

Для опису невизначеностей в задачах автоматичного управління використовуються три методи: ймовірнісний (стохастичний), використання нечіткої логіки (fuzzy logic), хаотичні системи. Вперше термін нечітка логіка (fuzzy logic) був введений американським професором Лотфі Заде у 1965 році в роботі «Нечіткі множини» в журналі «Інформатика та керування».

Областю впровадження методів нечіткої логіки являються різні системи керування, у тому числі: нелінійний контроль за процесами (виробництво);

системи, що самонавчаються (класифікатори), дослідження ризикових та критичних ситуацій; розпізнавання образів; фінансовий аналіз (ринки цінних паперів); дослідження даних (корпоративні сховища); удосконалення стратегій керування і координації дій, наприклад складне промислове підприємство [4; 9; 86; 102; 110; 113; 114; 121; 131].

Потужність та інтуїтивна простота нечіткої логіки як методології вирішення проблем гарантує її успішне застосування у вбудованих системах контролю та аналізу інформації. При цьому відбувається підключення людської інтуїції та досвіду оператора [73; 96; 112].

На відміну від традиційної математики, яка потребує на кожному кроці моделювання точних і однозначних формулювань закономірностей, нечітка логіка пропонує цілком інший рівень мислення, завдяки якому творчий процес моделювання відбувається на найвищому рівні абстракції, при якому використовується лише мінімальний набір закономірностей [106].

Нечіткі числа, які отримуються в результаті «не повністю точних вимірювань», багато в чому аналогічні розподілам теорії ймовірностей, але вільні від притаманним останнім недолків: мала кількість придатних до аналізу функцій розподілу, необхідність їх примусової нормалізації, дотримання вимог адитивності, труднощі обґрунтування адекватності математичної абстракції для опису поведінки фактичних величин. При зростанні точності нечітка логіка приходить до стандартної, Булевої. У порівнянні з ймовірнісним методом, нечіткий метод дозволяє різко скоротити об'єм необхідних обчислень, що, у свою чергу, призводить до підвищення швидкодії нечітких систем [98; 101; 128].

Недоліками нечітких систем являються:

- відсутність стандартної методики конструювання нечітких систем;
- неможливість математичного аналізу нечітких систем існуючими методами;
- застосування нечіткого підходу у порівнянні із ймовірнісним не призводить до підвищення точності обчислень.

Розглянемо конкретні приклади. Більшість засобів для прогнозування паводків в Індії базуються на статистичних методах (R.D. Singh [134]). Для деяких пілотних проектів використовуються мережеві або багатопараметричні гідрологічні моделі. Традиційні систем комунікації зазвичай використовуються для передачі даних у реальному часі. Автоматичні системи комунікації, наприклад системи телеметрії, зазвичай використовуються у пілотних проектах або в обмежених масштабах. У посушливих і напівпосушливих територіях трапляються стрімкі повені. Система для прогнозування повенів відсутня. В результаті виникають людські жертви і втрати майна. Тому є необхідність у значному покращенні прогнозування повенів у реальному часі. Ефективні автоматичні комунікаційні системи необхідні для передачі даних у реальному часі. Засоби прогнозування, такі як детерміністичні, стохастичні моделі, штучні нейронні мережі та нечітка логіка потребують навчання, підходящий метод може бути рекомендований для широкого застосування і базується на виконанні оціночного критерію і розглядає корисність даних та мету прогнозу. Інформація про повінь повинна своєчасно поширюватися серед населення так, щоб план евакуації можна було вчасно спланувати і реалізувати. Гідрологічну інформаційну систему планується розробити для усіх річок Індії [134].

Виникнення повенів та їх прогнозування залежить від роботи природної дренажної системи річки. Цей процес є комплексним і його відображення у відповідну модель для автоматичного прогнозування повенів, відповідно, є складним. Гідрологічні моделі корисні тому, що представляють процеси у світі. Математичні моделі, розроблені на базі фізичного або статистичного аналізу для оцінки повенів від малих до великомасштабних водозборів, вимагають точних знань про усі вхідні змінні. Нечітка логіка пропонує більш гнучкий, менш залежний від припущень та самоадаптивний метод для моделювання процесів виникнення повенів, які за своєю природою є складними, нелінійними та динамічними. Моделі на базі нечіткої логіки можуть використовуватися для моделювання процесів з неповною вхідною інформацією. Нечітка логіка високо цінується як ефективний метод роботи з нелінійностями, які присутні у

гідрологічних процесах (Zadeh, 1965 [134]). Більше того, даний засіб може використовуватися для моделювання систем у реальному часі (Lohani, 2005 [134]). До інших переваг нечіткої логіки належать можливість швидко розробляти моделі, менший час моделювання і, як наслідок, нижча ціна, можливість інтегрувати нечітку логіку у традиційні моделі, здатність надавати засоби для прогнозування. Процедури нечіткої логіки використовуються, коли традиційні процедури є досить складними або дорогими, у модельованому процесі присутня нечітка, змінна у часі інформація. У нечіткій логіці можна описувати наявні знання прямо у лінгвістичні формі відповідно до правил. Кількісна та якісна властивості можуть бути поєднані у нечіткій моделі. Внаслідок цього процес моделювання стає простішим, легше керованим і наближеним до людського мислення у порівнянні із традиційними методами. Використання нечіткої логіки для процесів прогнозування в гідрології є відносно новою областю для досліджень і потенціалом для покращення прогнозування повенів шляхом поєднання інших технологій м'яких обчислень у гібридні рішення. Нещодавно теорія нечіткої логіки була представлена, щоб пов'язати між собою змінні у розрахунках гідрологічних процесів і моделювання поведінки агрегатів. В подальшому концепція прийняття рішень на основі нечіткої логіки (Bellman, Zadeh, 1970 [134]), нечітке математичне програмування мають великий потенціал у моделях прогнозування повенів для прийняття вагомих рішень в умовах невизначеності [134].

Нечітка логіка застосовується у геології для представлення величин у вигляді нечітких множин, визначення різних геологічних характеристик (пористості, швидкості росту коралів, рівня осадочних утворень, проникності ґрунту), у геотехнічній інженерії, поверхневій і підґрунтовій гідрології, дослідженні гідрокарбонатних порід, оцінці ґрунтових вод, дослідженні процесів виникнення землетрусів, ґрунтів та геоморфології, зміщення осадочних порід; у гідрокліматичному моделюванні (довготермінове статистичне прогнозування засух у Небрасці (США) та Угорщині, довготермінове статистичне прогнозування опадів в Угорщині, Аризоні (США)

та Німеччині) [99]; дослідження відкладень вапняку, осадових порід, наносів піску, зміни рівня моря, границь континентів, морфології каналів, річкових наносів [131].

Нечітка логіка у гідрології застосовується для моделювання та представлення величин, наприклад, метеопараметрів (температура, вологість, опади, атмосферний тиск тощо), евапорації, температури води, інфільтрації, поверхневого стоку у вигляді нечітких множин; класифікації клімату, водоносних горизонтів, оцінки величини сонячної радіації, водного балансу, прогнозування та моделювання рівня води в озерах. Проводилося також моделювання інтенсивності руху транспорту по річках; прогнозування споживання питної води людиною в залежності від її ваги, рівня фізичної активності та температури повітря, споживання питної води конкретними містами (Туреччина) [123].

Отже, за своїми властивостями методи нечіткої логіки придатні також і для моделювання складних, нелінійних процесів вологопереносу в ґрунтах.

1.3.2 Використання нейронних мереж у меліорації, гідрології, керуванні водними ресурсами

Нейронні мережі (НМ) являють собою обчислювальні структури для моделювання простих біологічних процесів, що асоціюються з процесами мозку людини [18]. НМ представляють собою системи, здатні до адаптації та навчання шляхом аналізу позитивних і негативних впливів. Елементарним перетворювачем у даних мережах являється штучний нейрон – аналог біологічного нейрону.

Сучасний стан теорії і практики створення штучних нейронних мереж і нейрокомп'ютерів привело до розробки принципово нових алгоритмів і методів керування нелінійними динамічними об'єктами.

Більшість схем нейромережевого керування засновані на використанні таких підходів [15; 86; 90]:

1. Послідовна схема керування (рис. 1.9). Якщо позначити відношення

«вхід-вихід» для об'єкта керування як f , то НМ реалізує зворотне відображення $u=f^{-1}(y)$. Таким чином, якщо подати на НМ опорний сигнал r , то вихідний сигнал об'єкта керування y приймає значення r , тому що $y=f(u)=f(f^{-1}(r))=r$.

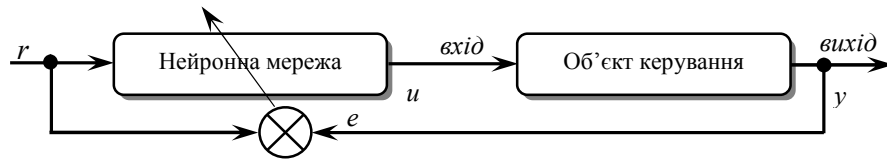


Рисунок 1.9 – Нейрокерування зі зворотнім відображенням

2. Паралельні схеми керування (рис. 1.10). НМ паралельного типу використовується для підлаштування керуючого вхідного сигналу u_1 , що є вихідним сигналом звичайного ПД-контролера. Налаштування виконується таким чином, щоб вихідний сигнал об'єкта керування y як можна точніше відповідав заданому опорному сигналові r .

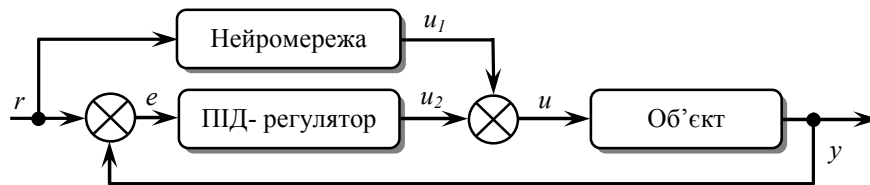


Рисунок 1.10 – Паралельна схема нейроконтролера

3. Схема керування із самоналаштуванням (рис. 1.11). Тут НМ використовується для налаштування параметрів звичайного контролера подібно налаштуванню, виконуваного людиною-оператором.

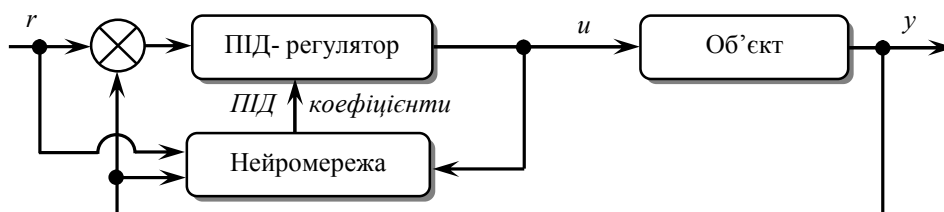


Рисунок 1.11 – Схема нейронного керування із самоналаштуванням

4. Схема керування з емулятором і контролером (рис. 1.12). Нейроконтролер навчається на інверсній моделі об'єкта керування, а нейроемулятор на звичайній моделі об'єкта. Нейроконтролер може навчатися безпосередньо на основі зворотного поширення помилки через нейроемулятор.

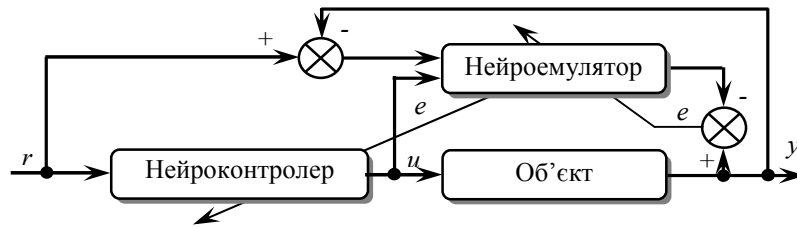


Рисунок 1.12 – Схема з емулятором та нейроконтролером

Для аналізу цих схем нейронного керування розроблені алгоритми навчання НМ і програмні моделі, на яких проводяться дослідження процесів керування динамічними об'єктами.

Одним із напрямків застосування ШНМ є прогнозування величин, що змінюються в часі. Характерними ознаками доцільності застосування нейронних мереж до вирішення сформульованої задачі є :

- відсутній алгоритм або невідомі принципи вирішення задач, але накопичене достатнє число прикладів;
- проблема характеризується великими обсягами вхідної інформації;
- дані неповні або надлишкові, зашумлені, частково суперечливі.

Поряд з цим можна сформулювати прогнозуючі властивості штучних НМ до яких зокрема належать:

1. Здатність НМ здійснювати багатопараметричний прогноз.
2. Необхідна оперативність прогнозування, що досягається максимальною розпаралеленістю процесу обробки інформації.
3. Нечутливість до недоліків апріорної інформації про динаміку прогнозованого об'єкта.
4. Можливість обробки даних, представлених у різнотипних шкалах.
5. Внаслідок повної зв'язності й великої кількості штучних нейронів, НМ зберігає своїх властивості навіть при руйнуванні її окремої частини. Як наслідок, проявляється висока надійність НМ і толерантність результатів прогнозу Y_i^{t+1} до перекручувань і перешкод у вхідних векторах X_i^{t+1} .
7. Здатність до донавчання.
8. Можливість прогнозування стрибків і подій, що не спостерігалися

раніше в навчальній вибірці спостережуваного об'єкта, може бути вибором або синтезом НМ такого типу, які здатні виробляти прототип й узагальнювати прецеденти по їхній подібі.

На даний момент розроблено методи прогнозування повені у реальному часі на базі нейронних мереж, зокрема в Індії (R.D. Singh [134]). Методи прогнозування повені у реальному часі на базі статистичних або стохастичних моделей базуються на припущеннях лінійності, хоча кількість поверхневого стоку як результат випадіння опадів залежить від декількох факторів, дана залежність є нелінійною, тому її зручно представити на базі нейронної мережі. Використання нейронних мереж для прогнозування повені у реальному часі знаходиться на етапі розвитку.

Підтоплення сільських територій на півдні України є значною соціальною проблемою, що має негативні екологічні та економічні наслідки, вимагає оцінки впливу різних чинників на процеси підтоплення, прогнозування їхнього впливу та прийняття рішень щодо покращення ситуації. Для розв'язання даної задачі запропоновано методику системної оцінки та прогнозування підтоплення територій на основі пересептронних моделей (Шевчук С.А. [89]). Дослідження проведені в смт. Каланчак Херсонської області. Дослідження процесів коливання РГВ показали, що воно тісно пов'язано із випаданням аномальної та нерівномірної кількості атмосферних опадів. Прогнозування РГВ на основі інформаційної технології дозволяє здійснювати системне управління територією як сукупністю інженерних заходів для запобігання або зменшення шкідливої дії підтоплення, наприклад, визначити необхідність попереджувального ввімкнення дренажних насосних станцій.

За допомогою нейронних мереж здійснюється оцінка опадів, річкового стоку та форми хмар за допомогою аналізу супутникового знімку досліджуваної території в Австралії, США, Мексиці та Північній Африці (програмне забезпечення (ПЗ) Persiann) (S. Sorooshian, K.-L. Hsu, B. Imam, and Y. Hong [134]). Проводилося моделювання геофізичних процесів на базі нейронних мереж, зокрема літологічні оцінки та дослідження акустичного

опору за допомогою інтеграції сейсмічних і геологічних даних [120]. Нейронні мережі, замість методів регресійного аналізу, використовуються для виведення педотрансферних функцій, які відображають залежність між основними та гідравлічними властивостями ґрунтів [117]. Більшість ознак доцільності застосування нейронних мереж притаманні ОЗС, тому нейронні мережі можуть бути використані для розробки нових методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахуванням дії збурень.

1.4 Мета роботи і задачі дослідження

Проведений у розділі 1 аналіз вказує на існування низки невирішених проблем, зокрема відсутність прогнозуючих математичних моделей вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту, діючих в оперативному режимі; відсутність методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з оперативним врахуванням дії збурень, забезпеченням економії водних та енергетичних ресурсів; недосконалість структури гідравлічних регуляторів вологості кореневого шару ґрунту; відсутність комплексної автоматизації ОЗС із включенням усіх елементів у єдину інформаційну систему. Все це вказує на актуальність дослідження в галузі автоматизації процесів вологозабезпечення сільськогосподарських культур і дозволяє сформулювати мету і задачі дослідження.

Метою роботи є розробка моделей і методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах з підґрунтовим зволоженням для підвищення ефективності функціонування цих систем та забезпечення отримання гарантованих врожаїв сільськогосподарських культур з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети планується вирішити наступні задачі:

1. Аналіз існуючих методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, математичних моделей вологопереносу.

2. Розробка прогнозуючих математичних моделей вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нейронних мереж; математичне моделювання процесу вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту на базі диференціального рівняння; розробка математичної моделі колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту.

3. Розробка методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням дії збурень на основі нейронних мереж; при крапельному зволоженні – на основі нечіткої логіки з врахуванням впливу випадкових збурень на об'єкт; оптимізація енергетичних затрат і витрат води в автоматизованій системі керування вологозабезпеченістю з врахуванням очікуваної врожайності сільськогосподарських культур.

4. Удосконалення структури гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії на базі мікропроцесорного модуля.

5. Розробка і впровадження програмного забезпечення та апаратної частини автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур.

1.5 Основні результати і висновки до розділу

Проведений у розділі 1 аналіз показав, що:

1. Проблема керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у цілому світі є надзвичайно важливою. Перетворення сільськогосподарського виробництва у високорозвинутий сектор економіки можливе лише зі зменшенням його залежності від несприятливих природо-кліматичних умов, підвищенням продуктивності використання обмежених природних ресурсів.

2. ОЗС з підґрунтовим зволоженням мають значну інерційність, що впливає на оперативність керування водно-повітряним режимом ґрунту.

Сучасний рівень автоматизації ОЗС є недостатній і не забезпечує потрібну точність та оперативність керування вологістю.

3. Для покращення роботи ОЗС необхідно розробити нові методи керування, які дозволять забезпечити необхідні умови експлуатації, задану точність керування, отримання планових врожаїв сільськогосподарських культур з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів, а також зможуть оперативно враховувати вплив змінних збурень на об'єкт керування.

4. Оптимальне регулювання водно-повітряного режиму ґрунту можливе лише при комплексному підході, що передбачає автоматизацію всієї технологічної лінії керування як на полі, так і на водопровідній мережі. При цьому необхідно вдосконалити існуючі гідравлічні регулятори, що встановлюються на регулюючій мережі для керування рівнем ґрунтових вод, а також розробити багаторівневу автоматизовану систему керування та збору даних на основі сучасних ТЗА, що дозволить зв'язати усі засоби автоматизації у єдину інформаційну систему, вести централізовану базу даних технологічних параметрів, забезпечити функціонування системи керування у різних режимах (автоматичному, ручному дистанційному, ручному за місцем), покращити умови праці обслуговуючого персоналу, підвищити надійність роботи ОЗС.

5. Розв'язання задач розробки прогнозуючих математичних моделей вологопереносу, методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з оперативним врахуванням дії збурень, забезпеченням економії водних та енергетичних ресурсів, удосконалення структури гідравлічних регуляторів вологості, комплексної автоматизації ОЗС із включенням усіх елементів у єдину інформаційну систему може бути досягнуто за допомогою застосування методів інтелектуального керування і моделювання на базі нечіткої логіки та нейронних мереж, впровадження сучасних технічних засобів автоматизації та інформаційних технологій.

6. У розділі 1 сформульовано мету та задачі дослідження.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В НЕНАСИЧЕНІЙ ЗОНІ МОДУЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ ГРУНТУ

2.1 Структура осушувально-зволожувальної системи Рівненської дослідної сільськогосподарської станції

В якості типового об'єкту керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з підґрунтовим зволоженням обрано осушувально-зволожувальну систему Рівненської дослідної сільськогосподарської станції. ОЗС площею 693 га запроектована Рівненським філіалом Укрдержводгоспу 1976 року і побудована 1979 року як дослідно-показова [32]. Площа зволоження складає 488 га, у тому числі дві ділянки підґрунтового зволоження із закритого дренажу – 65 та 88 га, площа осушення – 205 га. Територія системи розташована на II та III надпойменних терасах р. Горинь. Меліорований масив знаходиться у південній частині Західного Полісся.

Ділянка підґрунтового зволоження розташована на пониженій західній частині меліоративної системи. Територія її має спокійний слабохвилястий рельєф з дрібними блюдцеподібними пониженнями, відмітки поверхні змінюються у межах 186-188 м. До меліорації землі ділянки використовувалися переважно як малопродуктивні природні сінокоси та пасовища. Основною причиною перезволоження являлося відсутність стоку вод атмосферних опадів і підживлення ґрунтових вод зі сторони підвищених ділянок. При таненні снігу або в період дощових паводків за рахунок інфільтрації поверхневих вод відбувалося вклинювання ґрунтових вод і підтоплення території. Навіть у середні за вологозабезпеченістю роки вже до середини періоду вегетації рівні ґрунтових вод під впливом сумарного випаровування знижувалися до двох і більше метрів, що призводило до переосушення кореневмісного шару ґрунту.

Згідно з інженерними дослідженнями [32], у межах меліорованого масиву гідравлічний зв'язок ґрунтових вод з нижче лежачим напірним водоносним горизонтом відсутній завдяки водоупорній товщі елювіального шару крейдяних відкладень.

Ґрунти дослідної ділянки належать до лугово-чорноземних крупно-пилуватих легко-суглинистого та супіщаного механічного складу. Даний тип ґрунтів на території південного Полісся та Лісостепу України поширений на площі 522.2 тис. га [1]. Досліджувані ґрунти приурочені до знижених ділянок пойменних терас річок, внаслідок чого являються основним об'єктом гідротехнічних меліорацій.

Схема експериментальної ділянки наведена у додатку А. Вода на зволоження подавалася із р. Горинь стаціонарною насосною станцією першого підйому ($Q=0.21 \text{ м}^3/\text{добу}$) в акумулюючий зволожувальний басейн (ЗБ), звідки стаціонарною насосною станцією другого підйому ($Q=0.285 \text{ м}^3/\text{добу}$) високонапірним (ТЗ) і низьконапірними Т-3-4-1 і Т-3-4-2 трубопроводами у колодязі зволожувальних колекторів. Високонапірний трубопровід для регулювання тиску обладнаний регуляторами РТ-1, водовипуски низьконапірних трубопроводів обладнувалися мембранними регуляторами водоподачі, що забезпечують підтримку заданого рівня у колодязях зволожувальних колекторів. Устьові колодязі дренажних колекторів обладнувалися регуляторами дренажного стоку.

На дослідній ділянці закладено гончарний дренаж з міждренними відстанями 16-20 м і глибиною дренажу 1 м.

2.2 Визначення факторів впливу на ріст та розвиток сільськогосподарських культур

Вода – один з елементів родючості ґрунту. У період росту рослини споживають велику кількість води, з якої 0,01-0,03 % іде на утворення рослинних тканин, решта витрачається на транспірацію (випаровування)

листям і стеблами рослин. Сільськогосподарські культури пред'являють певні вимоги до водного режиму ґрунту. Максимальна врожайність досягається лише при оптимальній кількості вологи, живлення, тепла, повітря і світла. При нестачі або надлишку вологи в ґрунті врожайність культур знижується. У першому випадку рослини страждають від нестачі вологи і поживних речовин, у другому – від нестачі повітря у ґрунті. Однією із основних умов, які визначають потребу рослин у воді, являється тривалість критичних фаз розвитку рослин. Розрізняють 4 фази, в яких рослини найбільш чутливі до нестачі вологи в ґрунті: проростання, кушіння, цвітіння і дозрівання. Необхідний для сільськогосподарських культур водний режим ґрунту створюється відповідним режимом зрошення, який встановлює норми, терміни і кількості поливів в залежності від біологічних особливостей культур, природних і господарських умов.

При визначенні витрат води на зрошення сільськогосподарської культури враховують транспірацію води через листя та стебла рослин (Т), випаровування з поверхні ґрунту (Е). Це сумарне випаровування називають водоспоживанням, або евапотранспірацією (ЕТ). Водоспоживання залежить від кліматичних умов, кількості теплової енергії, яка надходить на поверхню, вологості ґрунту, виду та врожайності культури (рис. 2.1).

Виділяють 3 групи методів визначення водоспоживання сільськогосподарських культур: безпосередні польові вимірювання, метеорологічні, розрахункові (метод А.Н. Костякова, біокліматичний метод А.М. і С.М. Алпатьєвих, метод водного балансу (МВБ), метод теплового балансу (МТБ)). Обмеженість водних ресурсів і в зв'язку з цим застосування нових способів зрошення, при яких поливна вода витрачається більш економно, викликає необхідність не тільки точно визначати, але й прогнозувати потребу рослин у воді протягом вегетаційного періоду.

На ріст і розвиток сільськогосподарських культур впливають такі фактори, як аерація, температура та вологість ґрунту, рівень ґрунтових вод (РГВ), кліматичні умови (температура та відносна вологість повітря, швидкість

вітру, кількість сонячної радіації, опади), тип ґрунту, наявність у ґрунті поживних речовин [108].

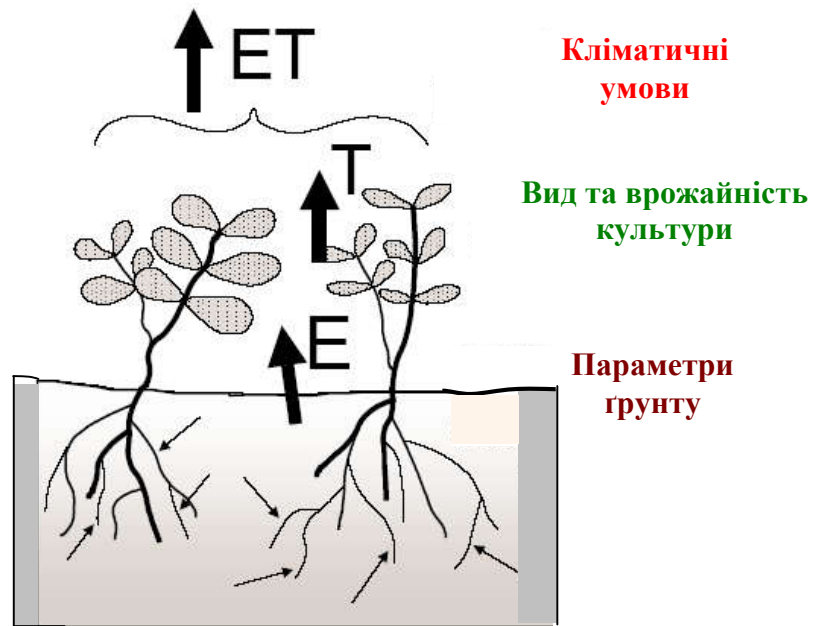


Рисунок 2.1 – Фактори, що впливають на евапотранспірацію:

E – евапорація, T – транспірація, ET - евапотранспірація

Не вся волога у ґрунті доступна для рослин. При зниженні вологості ґрунту до вологості зав'ядання (ВЗ) настає категорія труднодоступної вологи, за якої рослини ще не гинуть, але вже не можуть рости. Наступна категорія води в інтервалі ВЗ – вологість гальмування росту (ВГР) доступна для рослин, але вимагає надмірного зусилля щодо її видобування, тому розвиток рослин затримується. Найкраще себе почувають рослини в інтервалі вологості ґрунту ВГР – максимальна рівноважна вологість (МРВ), при якій спостерігається сприятливе для рослин співвідношення між вмістом води та повітря. Подальше підвищення вологості ґрунту вже таїть небезпеку погіршення його аерації, а, отже, і зниження врожайності. У таблиці 2.1 наведено експериментально визначені значення ВГР багаторічних трав [20]. Детальний опис впливу різних факторів на ріст та розвиток сільськогосподарських культур наведено у додатку Б.

Оптимізація водно-повітряного режиму зони аерації при вирощуванні сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах (ОЗС) з підґрунтовим зволоженням можлива тільки при створенні автоматизованих систем керування (АСК) вологозабезпеченістю, які враховують випадкові зміни погодних умов і можуть працювати при неповній інформації про об'єкт керування.

Таблиця 2.1 – Нижня межа оптимальної вологості по фазам розвитку багаторічних трав

| Культура | № між-фазного періоду | Найменування між фазних періодів | Всмоктуючий тиск, який відповідає нижній межі оптимальної вологості, атм | Нижня межа інтервалу оптимального вологовмісту, % від повної вологоємності ґрунту | | | |
|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------|------|
| | | | | пісок | супісок | середній суглинок | торф |
| Багаторічні трави | 1 | відновлення вегетації – утворення бічних паростків | 0.30-0.35 (3-3.5 м вод.ст.) | 52 | 60 | 63 | 62 |
| | 2 | утворення бічних паростків – утворення суцвіття | 0.20-0.25 (2-2.5 м вод.ст.) | 55 | 64 | 66 | 67 |
| | 3 | утворення суцвіття – цвітіння | 0.10-0.15 (1-1.5 м вод.ст.) | 62 | 70 | 72 | 73 |
| | 4 | цвітіння - збирання | 0.25-0.30 (2.5-3 м вод.ст.) | 54 | 62 | 64 | 65 |

2.3 Розробка структурної схеми автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні

Структурну схему каскадно-комбінованої АСК вологозабезпеченістю модульної ділянки ґрунту за допомогою зміни рівня ґрунтових вод наведено на рис. 2.2, де W_3 і W – заданий та вимірний всмоктуючі тиски ґрунту відповідно;

L_3 і L – заданий та вимірний рівні води у керуючому колодязі відповідно; $E_W = W_3 - W$; $E_L = L_3 - L$ – розузгодження; $L_{гр.в.}$ – рівень ґрунтових вод; P_W – регулятор всмоктуючого тиску ґрунту; P_L – регулятор рівня води у керуючому колодязі; $ВМ$ – виконавчий механізм; PO – регулюючий орган. Внутрішнім контуром регулювання є контур регулювання рівня води у керуючому колодязі (об'єкт керування $OK1$), що вимірюється датчиком $LE1$, а зовнішнім, задаючим, - контур регулювання всмоктуючого тиску ґрунту, який характеризує вологість. Об'єкт керування $OK2$ представляє собою ділянку ґрунту з колекторно-дренажною системою. Він представлений на схемі у вигляді двох ланок.

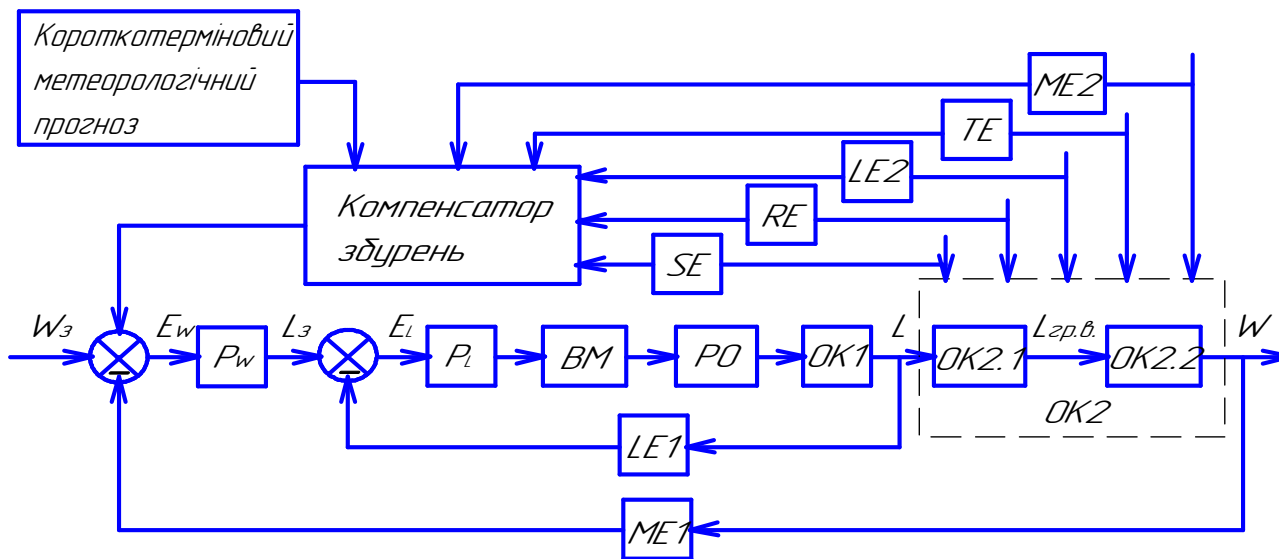


Рисунок 2.2 – Структурна схема касадно-комбінованої АСК вологозабезпеченістю модульної ділянки ґрунту за допомогою зміни рівня ґрунтових вод

Перша ланка $OK2.1$ відображає колекторно-дренажну систему та насичену зону ґрунту і перетворює рівень води у керуючому колодязі на напір у колекторно-дренажній системі, а напір – на рівень ґрунтових вод (РГВ) $L_{гр.в.}$. Друга ланка $OK2.2$ представляє собою ненасичену зону ґрунту і перетворює РГВ модульної ділянки на всмоктуючий тиск кореневмісного шару ґрунту W , що вимірюється датчиком $ME1$. На об'єкт керування $OK2$ діють наступні збурення: 1-температура навколишнього середовища (TE), 2-опад ($LE2$), 3-

освітленість (RE), 4-швидкість вітру (SE), 5-відносна вологість повітря (ME2), 6-структура ґрунту, 7-фаза розвитку рослини. Збурення 1-5 постійно змінюються в часі, а збурення 6 і 7 є сталими протягом певного достатньо великого проміжку часу. Крім того, величини збурень 1-5 можна передбачати з певною точністю на основі даних метеоспостережень.

Для підвищення точності регулювання і рівня технічної експлуатації ОЗС необхідно враховувати вплив збурень на систему. Оскільки збурення весь час змінюються в часі, АСК повинна весь час оперативно розраховувати режим підґрунтового зволоження і реалізовувати його на керованих модулях ОЗС з використанням технічних засобів водорегулювання.

2.4 Розробка математичних моделей вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нейронних мереж

2.4.1 Розробка математичної моделі вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення

Об'єкт керування ОК2.2 (рис. 2.2) представляє собою ненасичену зону ґрунту і перетворює РГВ модульної ділянки на всмоктуючий тиск кореневмісного шару ґрунту, об'єкт є просторово розподіленим. Крім РГВ, що є вихідною величиною об'єкта керування №2.1, на об'єкт діє ряд змінних збурень. За таких умов вивести передаточні функції об'єкта за кожним з каналів досить складно. Тому пропонується розробити модель об'єкта ОК2.2 у вигляді нейронної мережі, побудованої на основі експериментальних даних.

Побудова нейронної мережі складається з наступних етапів [87]:

1. Вибір типу (архітектури) мережі: вибір кількості нейронів, числа входів, передаточних функцій нейронів; вибір типів з'єднання нейронів; вибір вхідних та вихідних параметрів для нейронної мережі.
2. Формування тренувального та перевірного наборів даних.
3. Параметричне налаштування (навчання) мережі.

Основним джерелом знань про об'єкт моделювання (керований модуль меліоративної системи) є архів даних про зміну вхідних і вихідних параметрів. На базі архіву з врахуванням обраної архітектури нейронної мережі створювався набір тренувальних шаблонів $\{X_i, Y_i\}_j$, $j = \overrightarrow{1, J}$, кожен з яких включав вектор відомих вхідних сигналів X_{ij} і відповідний йому вихід мережі Y_{ij} . Навчання вибраного варіанта моделі зводиться до налаштування параметрів нейромережі (параметрів передаточних функцій нейронів, вагових коефіцієнтів) так, щоб вона найкраще запам'ятовувала набір тренувальних шаблонів. У випадку, якщо побудована мережа не забезпечує необхідну точність прогнозування, необхідно змінити архітектуру мережі. Ще одним способом підвищення точності прогнозування є збільшення передісторії. Але необхідно враховувати, що ускладнення моделі шляхом збільшення кількості її вхідних параметрів не може бути безмежним, оскільки це збільшує час її навчання і не завжди призводить до покращення результату прогнозування. При незадовільній точності прогнозування лише у деяких характерних точках, потрібно перевірити, чи фігурують подібні ситуації у наборі тренувальних даних. Адже нейронна мережа може запам'ятовувати лише ті дані, які пред'являються їй у процесі навчання, і не може прогнозувати ситуації, що не мають нічого спільного з тренувальними шаблонами. У той же час, нейронна мережа служить своєрідним індикатором правильності вибору нами вхідних параметрів. При включенні до вхідного вектора параметра, який тісно пов'язаний з модельованим процесом, похибка прогнозування зменшиться. І навпаки, при появі вхідного параметра, який ніяким чином не впливає на вихідну величину, нейромережа буде прогнозувати середньоквадратичне значення бажаних виходів із тренувального шаблона даних. Дану властивість нейронних мереж можна використати при визначенні, які вхідні параметри являються значущими, а які ні. Менш важливі параметри можна виключити із вхідного вектора мережі, тим самим спростивши її структуру, а, отже, і тривалість навчання. Наявність у структурі мережі вхідних параметрів, які

включають у себе значну випадкову складову, погіршує якість прогнозування. У цьому випадку вплив на вихідну величину навіть значущих параметрів може залишитися непоміченим [2; 3; 72].

З врахуванням усього вище сказаного сформуємо навчальну вибірку із експериментальних даних за 2 вегетаційні періоди двох суміжних років, яка включатиме 346 точок для моделювання вологозабезпечення сільськогосподарських рослин на керованому модулі меліоративної системи (додаток В). Дані одного вегетаційного періоду використаємо для навчання (173 точки), а іншого – для тестування (173 точки). Тестова вибірка даних не буде фігурувати при навчанні мереж. Система моделювання побудована для ґрунтів суглинистого та супіщаного механічного складу Рівненської дослідної сільськогосподарської станції.

Вихідним параметром нейромережі є всмоктуючий тиск ґрунту, який пов'язаний із вологістю ґрунту за допомогою основної гідрофізичної характеристики. Оскільки вологість ґрунту на наступному періоді керування залежить від погодних умов, рівня ґрунтових вод та поточних вологозапасів у ґрунті, представимо НМ для прогнозування вологості у вигляді:

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_k^h) \quad (2.1)$$

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h) \quad (2.2)$$

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), рівень ґрунтових вод L від світлової поверхні (м). Вихідним параметром є всмоктуючий тиск W^h (м) у визначеному шарі ґрунту h . $NN(\)$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок.

Водяна пара разом з масами повітря переноситься як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямі. У повітрі може бути більша чи менша кількість водяної пари, тобто повітря може мати різну вологість. Кількість водяної пари (у грамах), що міститься в 1 м^3 повітря, називається **абсолютною**

вологістю. Часто абсолютну вологість повітря визначають пружністю водяної пари (у мілібарах чи міліметрах ртутного стовпа), що міститься на даний момент у повітрі. При даній температурі пружність водяної пари (абсолютна вологість) не може перевищувати деякого максимального значення, після чого починається її конденсація. Ступінь насиченості водяною парою може бути охарактеризований дефіцитом вологості. **Дефіцит вологості** – це різниця між кількістю водяної пари, що насичує повітря при даній температурі, і кількістю водяної пари, яка фактично міститься у повітрі. З визначення дефіциту вологості випливає, що для його визначення необхідно знати значення абсолютної вологості і температуру повітря, за якою по таблицях визначають пружність водяної пари, що насичує повітря при даній температурі.

Точність прогнозування моделей (2.1) і (2.2) буде визначатися також точністю метеопрогнозу температури, відносної вологості повітря і кількості опадів.

Дослідимо, як впливає введення передісторії на один крок по всмоктуючому тиску ґрунту на точність роботи мережі. Побудуємо багатошарові НМ прямого розповсюдження, а саме багатошарові персептрони, у нейромуляторі NeuroPro. Параметри мереж: кількість шарів нейронів – 3, число нейронів у кожному шарі – 10, передаточні функції нейронів – сигмоїдні, діапазон зміни ваг адаптивних зв'язків між нейронами – $[-1; 1]$. Кожен вхідний сигнал мережі подається всім нейронам першого шару. У даному нейромуляторі після нейронів вихідного шару будується шар адаптивних суматорів з числом суматорів, рівним числу вихідних сигналів. З цих суматорів знімаються вихідні сигнали мережі. Перед подачею мережі всі вхідні сигнали нормуються у діапазон $[-1; 1]$, а сигнали вихідних суматорів нормуються в діапазон істинних значень вихідних сигналів. Швидкість навчання нейронної мережі залежить від потрібної точності навчання та алгоритму навчання. У програмі реалізовані градієнтні методи навчання, для яких градієнт функції оцінки по параметрах, що налаштовуються, обчислюється за принципом двоякості. Успіх навчання залежить від наявності конфліктних прикладів

(однакові вхідні і різні вихідні сигнали) у навчальній вибірці даних. Результати середньоквадратичного відхилення (СКВ) при навчанні і тестуванні багатошарових нейромереж наведено у таблиці 2.2. Результати тестування багатошарових нейромереж з 4-ма та 5-ма входами для різних шарів ґрунту наведено на рис. 2.3, 2.4 (с. 68-69).

Таблиця 2.2 – Результати навчання і тестування багатошарових нейромереж для прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту

| № | Нейромережа | Шар ґрунту | К-сть входів | К-сть кроків | | СКВ, м вод. ст. | | Нейроемулятор |
|-----|--------------|------------|--------------|--------------|------------|-----------------|------------|---------------|
| | | | | навчання | тестування | навчання | тестування | |
| 1.1 | Багатошарова | 0-10 см | 4 | 173 | 173 | 0.105 | 2.051 | NeuroPro |
| 1.2 | | | 5 | | | 0.108 | 1.7207 | |
| 2.1 | | 10-20 см | 4 | | | 0.053 | 1.2 | |
| 2.2 | | | 5 | | | 0.0402 | 1.0509 | |
| 3.1 | | 30-40 см | 4 | | | 0.046 | 0.811 | |
| 3.2 | | | 5 | | | 0.0352 | 0.6169 | |

Отже, як видно з таблиці 2.2, введення передісторії на один крок по всмоктуючому тиску ґрунту покращує точність роботи нейромереж. Нарощування передісторії далі не є доцільним, оскільки з ростом змінних ускладнюється структура мережі та технологія її навчання.

Вагомість вхідних сигналів оцінювалася засобами нейроемулятора NeuroPro при моделюванні багатошарових мереж. При цьому оцінювалася точність роботи нейромережі при видаленні одного із входів. Якщо якийсь із входів слабо впливає на роботу нейромережі, його можна в подальшому виключити для зменшення кількості вхідних параметрів і заново перевчити мережу. Проаналізуємо вплив вхідних сигналів на роботу багатошарових нейромереж з 4-ма та 5-ма входами для різних шарів ґрунту при їх навчанні та тестуванні. Вагомість вхідних сигналів при навчанні та тестуванні багатошарових нейромереж з 4-ма та 5-ма входами для шарів ґрунту $h=0-10$ см, $h=10-20$ см, $h=30-40$ см, а також аналіз зв'язку середнього значення всмоктуючого тиску ґрунту зі значеннями всмоктуючого тиску в різних шарах ґрунту наведено у додатку Г.

Розрахуємо середні значення вагомості вхідних параметрів при навчанні і тестуванні нейромереж з 4-ма та 5-ма входами для різних шарів ґрунту та представимо результати розрахунків на діаграмах (рис.2.5).

Як бачимо, найбільший вплив на вихід нейромережі з 4-ма вхідними параметрами мають прогноз по опадах, поточне значення всмоктуючого тиску ґрунту, що характеризує поточне значення вологозапасів у ґрунті, та прогнозне значення РГВ. Для мережі з 5-ма входами найважливішими параметрами є поточне та попереднє значення всмоктуючого тиску ґрунту, прогнозне значення РГВ та прогноз по опадах. В обох мережах найменший вплив на вихідний сигнал має метеопрогноз по дефіциту вологості повітря, проте він є достатньо значимий для того, щоб його лишити у якості входу.

Проведемо дослідження роботи нейромереж з різною кількістю нейронів прихованого шару та різними функціями передачі нейронів. Для дослідження використаємо редактор для роботи з нейронними мережами Neural Network Toolbox системи MatLab [27]. Усі розрахунки проведемо для мережі виду (2.2) для шару ґрунту $h=0-10$ см:

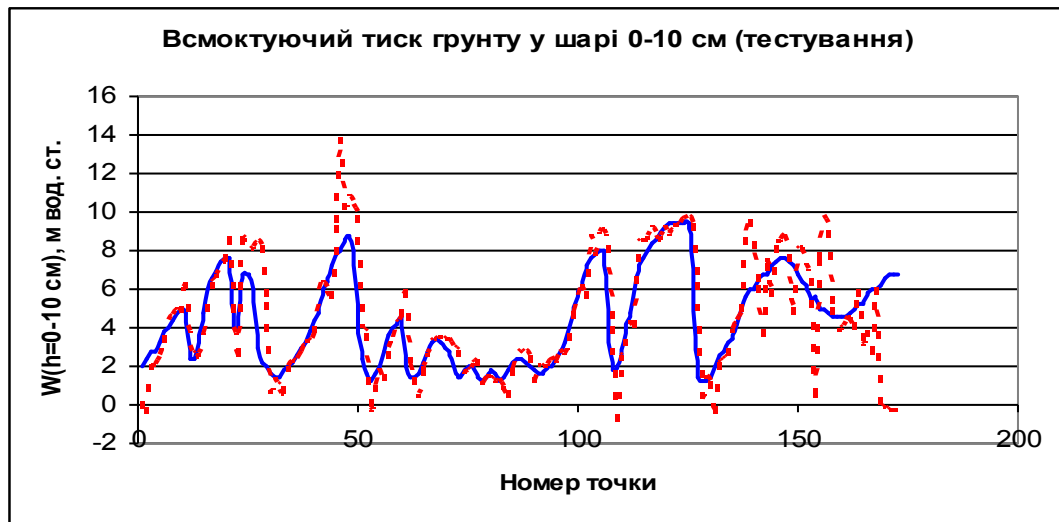
$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h).$$

Для створення нейромережі скористаємося функцією створення «класичної» багатошарової НМ прямого розповсюдження з навчанням за методом зворотного поширення помилки:

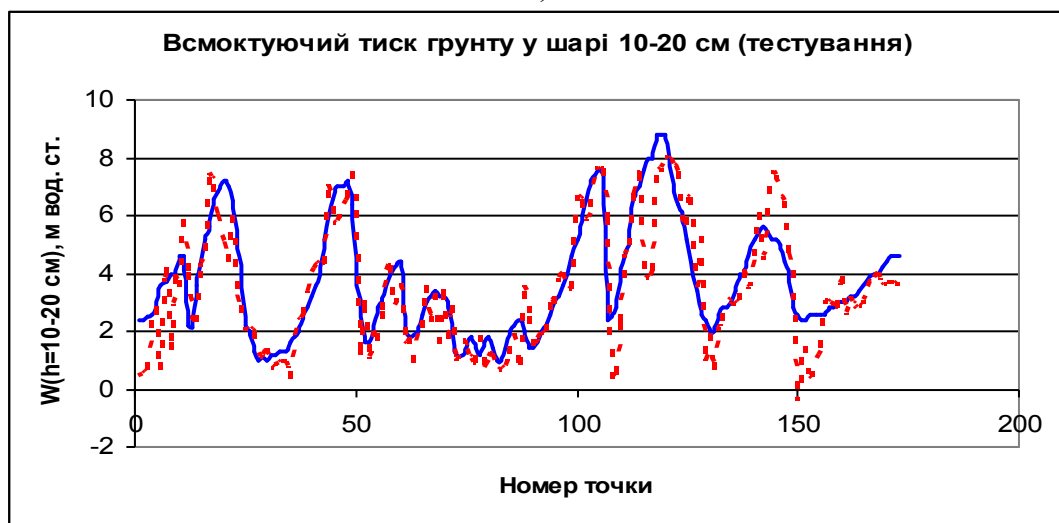
$$\text{net}=\text{newff}(\text{PR}, [\text{S1 S2 ... SNI}], \text{TF1 TF2 ... TFNI}, \text{BTF}, \text{BLF}, \text{PF}),$$

де PR – $R \times 2$ матриця мінімальних і максимальних значень для R вхідних елементів, Si – число нейронів i-го шару, для NI шарів, TFi – функція активації нейронів i-го шару, за замовчуванням ‘tansig’, BTF – функція навчання нейромережі, за замовчуванням ‘traingd’, BLF – функція налаштування ваг і зміщень, за замовчуванням ‘learngdm’, PF – функція помилки, за замовчуванням ‘mse’.

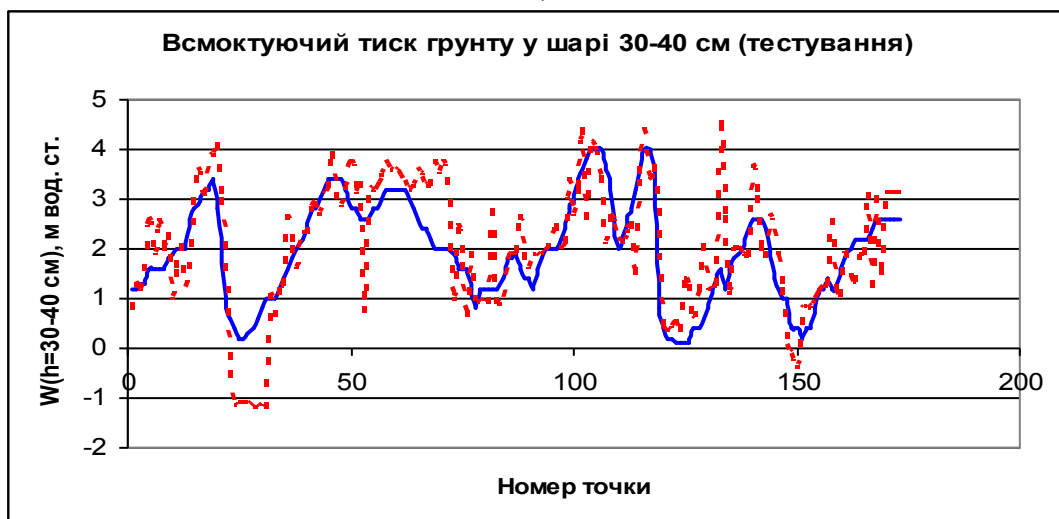
Дослідимо вплив функції навчання нейромережі на точність її роботи.



а)

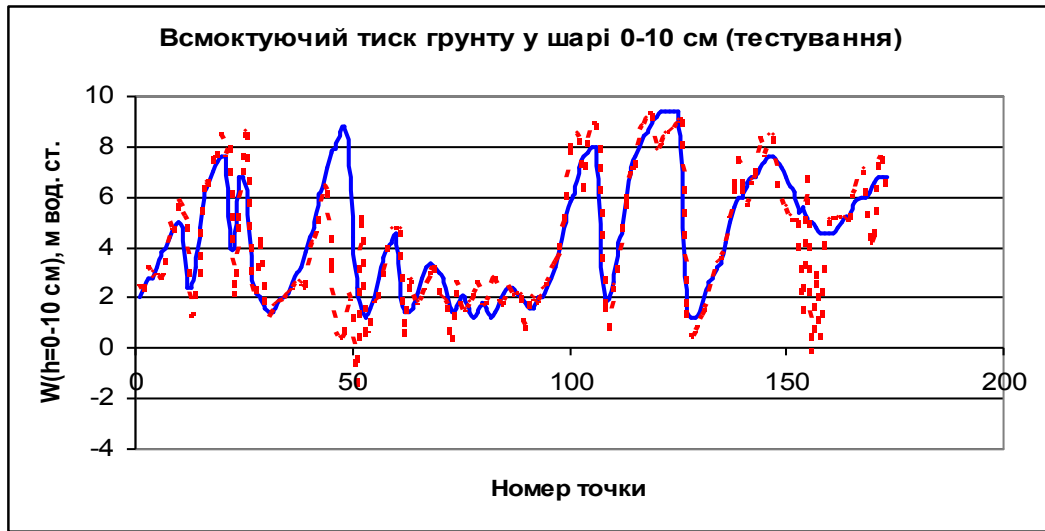


б)



в)

Рисунок 2.3 – Результати тестування багатошарової неймережі з 4-ма входами для різних шарів ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см:
— – тестувальна вибірка даних, - - - – результати роботи неймережі



а)

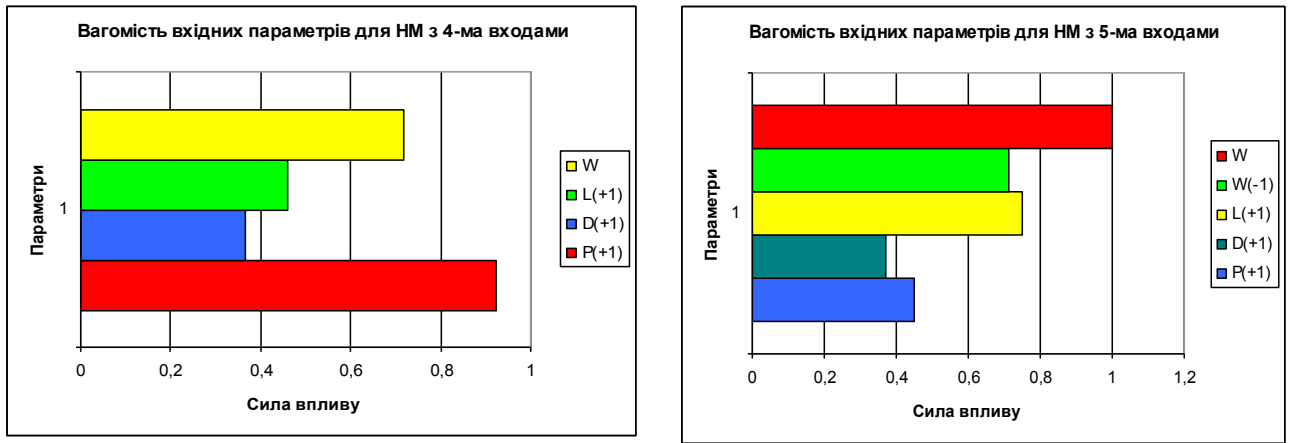


б)



в)

Рисунок 2.4 – Результати тестування багатошарової нейромережі з 5-ма входами для різних шарів ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см:
— – тестувальна вибірка даних, - - - – результати роботи нейромережі



а)

б)

Рисунок 2.5 – Вагомість вхідних параметрів для багатошарової нейромережі: а – з 4-ма входами, б – з 5-ма входами

Побудуємо двошарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – 3, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Результати дослідження наведено у таблиці 2.3. Як видно із таблиці 2.3, найкращий результат отримуємо при використанні функції, що реалізує Байєсівський метод навчання, - trainbr.

Дослідимо вплив виду функції активації прихованого шару нейромережі на точність її роботи. Побудуємо двошарові нейромережі з навчанням за методом зворотного поширення помилки з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – 3, кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Байєсівський ('trainbr'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Нейронна мережа для шару ґрунту $h=0-10$ см. Результати дослідження наведено у таблиці 2.4 та на рис.2.6. Результати тестування нейромережі для шару ґрунту $h=0-10$ см архітектури 5-3-1 наведено на рис. 2.7.

Таблиця 2.3 – Вплив функції навчання НМ для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту на точність її роботи

| № | Функція навчання нейромережі | Запис функції | СКВ на тестувальній вибірці даних, м вод. ст. |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|
| 1 | Різновид квазіньютонівського алгоритму зворотного поширення помилки (BFGS) | trainbfg | 1.7109 |
| 2 | Байєсівський метод навчання | trainbr | 1.2074 |
| 3 | Різновид алгоритму спряження градієнтів (метод Powell-Beal) | traincgb | 1.5519 |
| 4 | Різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Флетчера-Поуелла | traincgf | 1.5495 |
| 5 | Різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere | traincgp | 1.2443 |
| 6 | «Класичний» алгоритм зворотного поширення помилки | traingd | 2.4091 |
| 7 | «Класичний» алгоритм зворотного поширення помилки з адаптацією коефіцієнта швидкості навчання | traingda | 1.4930 |
| 8 | Модифікований алгоритм зворотного поширення помилки із введеною «інерційністю» корекції ваг і зміщень | traingdm | 2.3465 |
| 9 | Комбінований алгоритм навчання, який об'єднує особливості двох попередніх | traingdx | 1.5492 |
| 10 | Функція, що повертає ваги і зміщення мережі, використовуючи алгоритм Левенберга-Марквардта | trainlm | 1.5774 |
| 11 | Різновид алгоритму зворотного поширення помилки з використанням метода січних | trainoss | 1.6279 |
| 12 | Гнучкий алгоритм зворотного поширення помилки (RPROP) | trainrp | 1.2630 |
| 13 | Функція, що повертає ваги і зміщення мережі, використовуючи алгоритм масштабованих спряжених градієнтів | trainscg | 1.5106 |
| 14 | Функція, що корегує ваги і зміщення мережі у відповідності із заданою функцією навчання нейронів | trainwb | 1.6910 |
| 15 | Функція, що аналогічна попередній, але одночасно на вхід мережі пред'являється тільки один вектор входу | trainwb1 | 2.0348 |

Як видно з таблиці 2.4, найкращу точність роботи нейромережі отримуємо при сигмоїдних (логістичних) функціях активації нейронів прихованого шару, на 0.01 та 0.02 одиниці відрізняється точність при використанні тангенціальних та радіально-базисних функцій відповідно. Отже, будемо використовувати в подальшому сигмоїдну (логістичну) функцію передачі.

Дослідимо вплив кількості нейронів прихованого шару нейромережі на точність її роботи. Побудуємо двошарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – змінна величина, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Байєсівський ('trainbr'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse').

Змінюватимемо кількість нейронів прихованого шару від 1 до 20 і аналізуватимемо точність роботи мережі на тестувальній вибірці даних. Залежність точності роботи нейромережі архітектури 5-n-1, Logsig-Purelin від кількості нейронів прихованого шару наведено на рис. 2.8. Як видно з рис. 2.8, у прихованому шарі нейромережі достатньо трьох нейронів. При збільшенні числа нейронів точність роботи нейромережі значно не покращується, а швидкість навчання зменшується, тому нарощування кількості нейронів у прихованому шарі більше трьох не є доцільним. Дослідимо вплив нарощування кількості шарів нейронів на точність роботи нейромережі. Побудуємо тришарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – 3, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – n, функції активації нейронів другого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів третього шару – 1, функція активації нейрону третього шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Байєсівський ('trainbr'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse').

Таблиця 2.4 Вплив виду функції активації прихованого шару НМ для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту на точність її роботи

| № | Функція активації нейронів прихованого шару нейромережі | Формула | Область значень | Запис функції | СКВ на тестувальній вибірці даних, м вод. ст. |
|---|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------------------|
| 1 | Сигмоїдна логістична функція | $f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$ | (0; 1) | logsig | 1.2074 |
| 2 | Радіально-базисна (гаусова) | $f(s) = e^{-s^2}$ | (0; 1) | radbas | 1.2236 |
| 3 | Гіперболічний тангенс (сигмоїдна) | $f(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$ | (-1; 1) | tansig | 1.2120 |
| 4 | Трикутна | $f(s) = \begin{cases} 1 - s , & s \leq 1, \\ 0, & s > 1. \end{cases}$ | (0; 1) | tribas | 1.2523 |

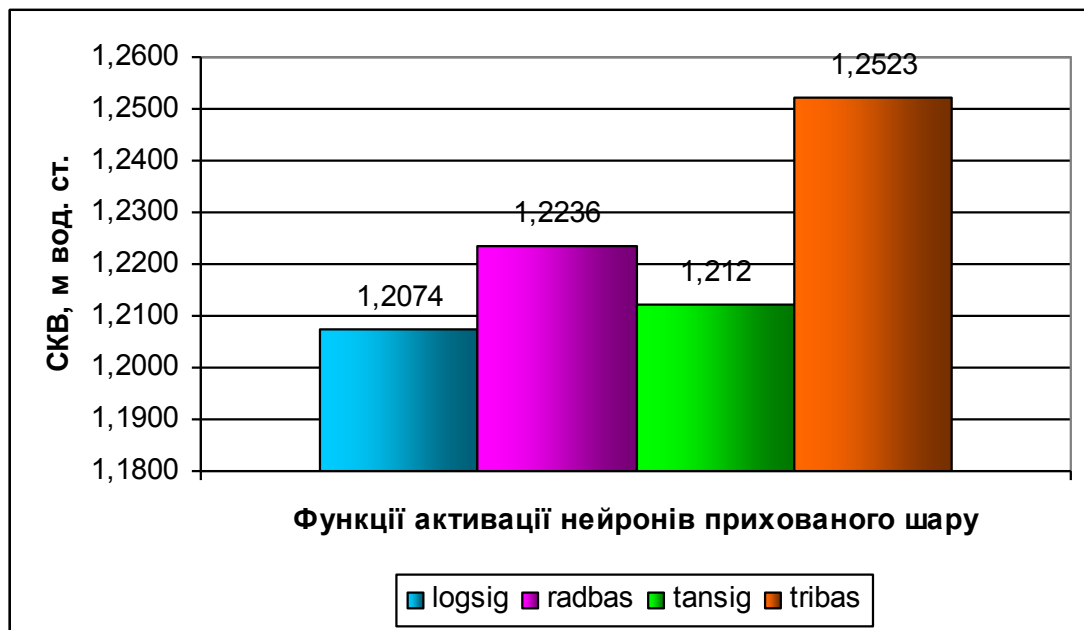
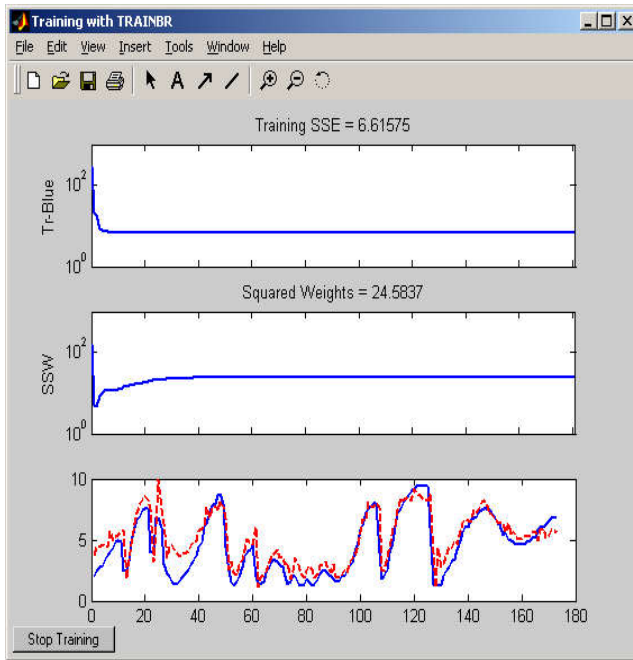
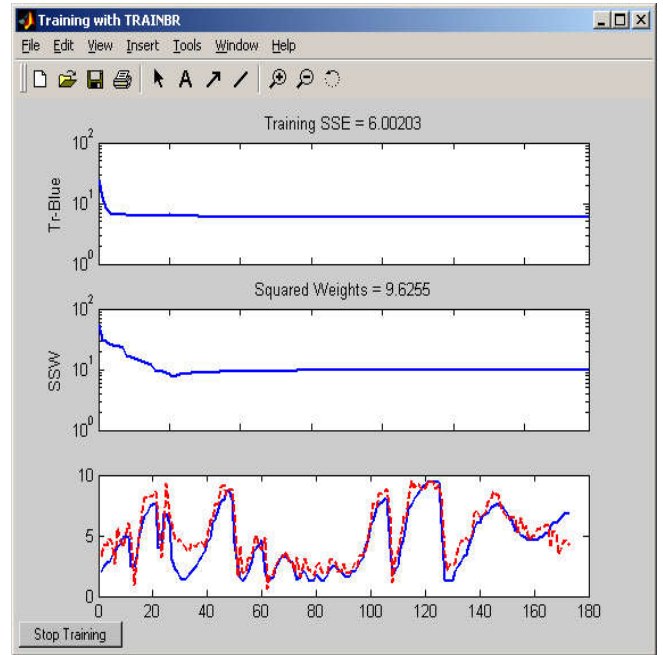


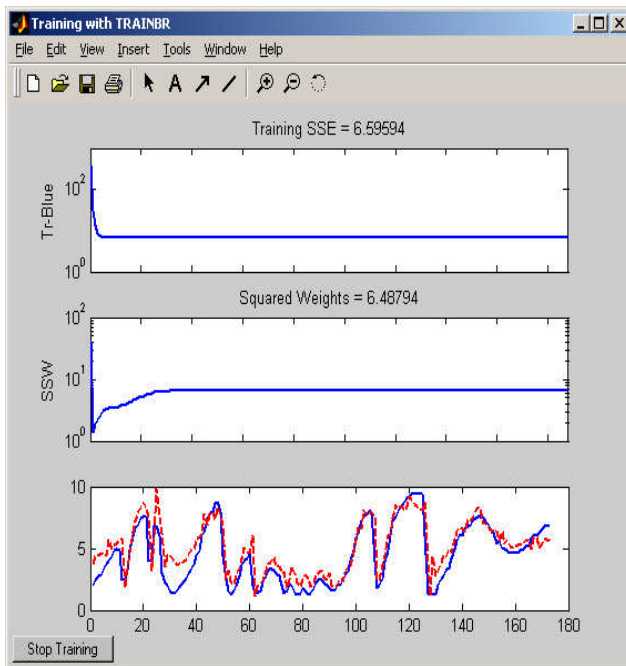
Рисунок 2.6 – Залежність точності роботи двошарової нейромережі архітектури 5-3-1 від виду функції активації нейронів прихованого шару



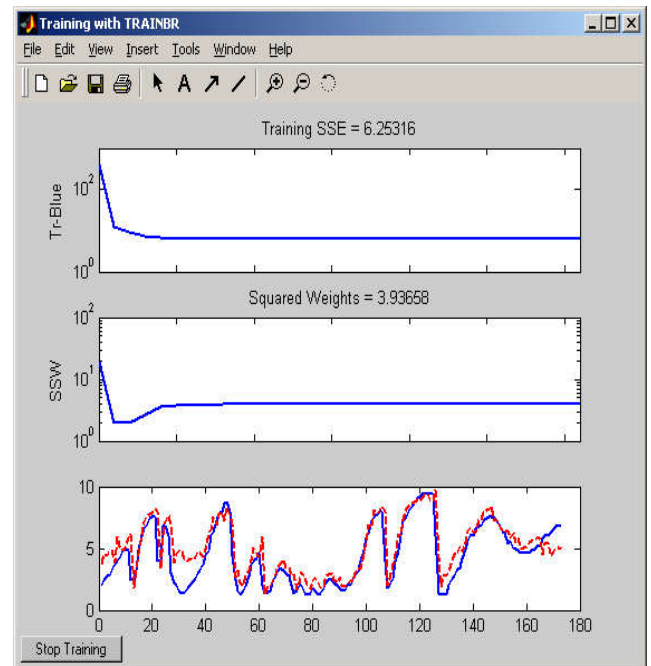
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.7 – Результати тестування неймережі для шару ґрунту $h=0-10$ см архітектури 5-3-1: а – Logsig-Purelin, б – Radbas-Purelin, в – Tansig-Purelin, г – Tribas-Purelin: ———— – тестувальна вибірка даних, - - - - - результати роботи неймережі



Рисунок 2.8 – Залежність точності роботи нейромережі архітектури 5-n-1, Logsig-Purelin від кількості нейронів прихованого шару

Залежність точності роботи нейромережі архітектури 5-3-n-1, Logsig-Logsig-Purelin від кількості нейронів другого прихованого шару наведено на рис. 2.9. Результати тестування нейромережі архітектури 5-3-1-1, Logsig-Logsig-Purelin для шару ґрунту $h=0-10$ см наведено на рис. 2.10.

Як видно з рис. 2.9, у другому прихованому шарі нейромережі достатньо одного нейрона. Разом з тим, введення другого прихованого шару не покращує якість роботи нейромережі. Тому для моделювання ненасиченої зони ґрунту доцільно використовувати двошарові нейромережі.

Побудуємо нейромоделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту також для шарів ґрунту 10-20 та 30-40 см. При цьому використаємо нейромоделі виду: кількість нейронів першого шару – 3, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Байєсівський ('trainbr'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Результати тестування нейромережі архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для шарів ґрунту 10-20 см та 30-40 см наведено на рис. 2.11. Результати моделювання наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати роботи нейромоделей архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту

| Шар ґрунту | К-сть точок | СКВ, м вод. ст. | |
|------------|-------------|-----------------|------------|
| | | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 173 | 1.4383 | 1.2074 |
| h=10-20 см | | 2.0571 | 1.6472 |
| h=30-40 см | | 1.2102 | 0.8521 |



Рисунок 2.9 – Залежність точності роботи нейромережі архітектури 5-3-n-1, Logsig-Logsig-Purelin від кількості нейронів другого прихованого шару

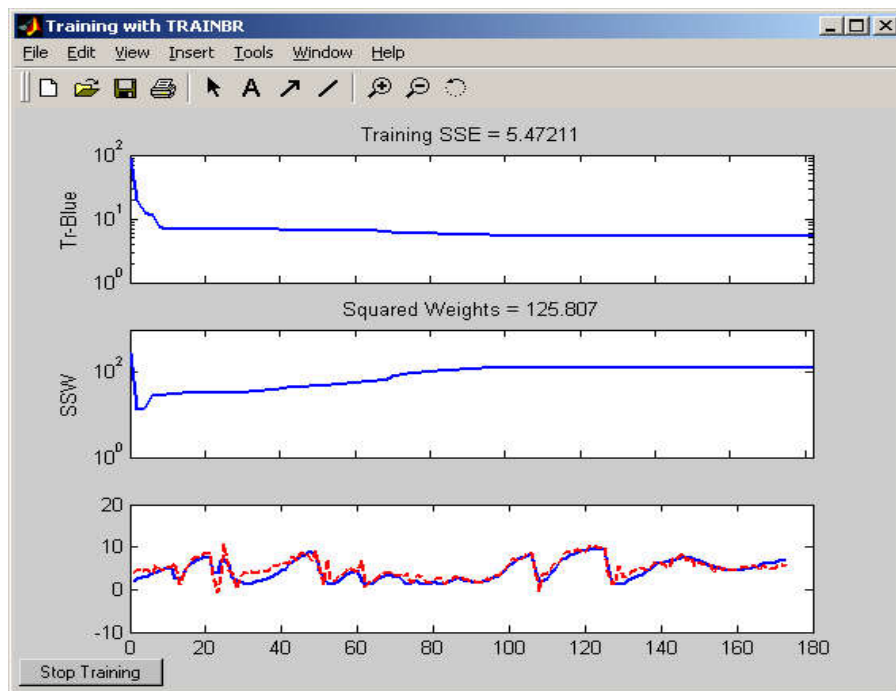
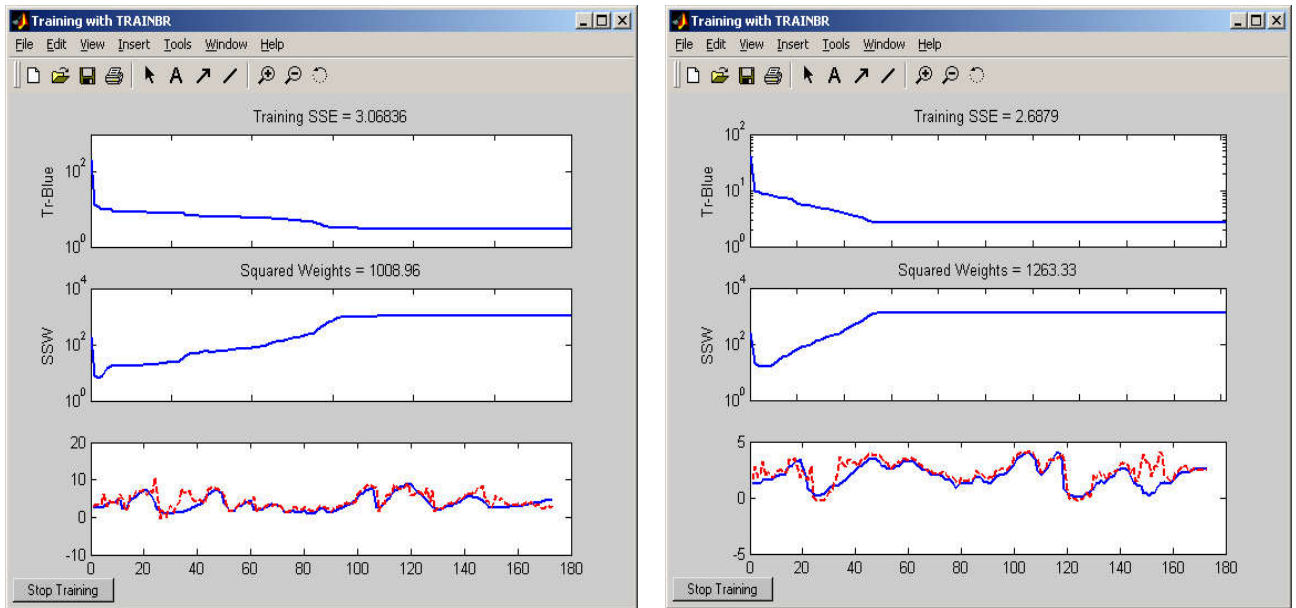


Рисунок 2.10 – Результати тестування нейромережі архітектури 5-3-1-1, Logsig-Logsig-Purelin для шару ґрунту h=0-10 см: ———— — тестувальна вибірка даних, - - - - - — результати роботи нейромережі



а)

б)

Рисунок 2.11 – Результати тестування неймережі архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для шарів ґрунту: а – $h=10-20$ см, б – $h=30-40$ см: ——— – тестувальна вибірка даних, - - - - - – результати роботи неймережі

2.4.2 Розробка математичної моделі вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі нео-фаззі мереж

Модульна ділянка ґрунту як об'єкт керування представляє собою складну розподілену у просторі систему. В загальному, однією із характерних ознак складності об'єкта керування являється невизначеність у представленні його структури або поведінки. При цьому сама категорія невизначеності може бути розглянута з різних точок зору. У рамках сучасної методології системного моделювання невизначеність може характеризувати наступні аспекти модельних уявлень: неясність або нечіткість границі системи; неоднозначність семантики окремих термінів, які використовуються при побудові концептуальних моделей систем; неповнота модельних уявлень про деяку складну систему, особливо у зв'язку з вирішенням слабо формалізуємих проблем; наявність протиріч між окремими компонентами модельних уявлень або вимог, які повинна задовольняти модель складної системи; невизначеність настання тих чи інших подій, які належать до можливості знаходження

системи-оригінала у тому чи іншому стані в майбутньому; лінгвістична невизначеність [21].

Як було сказано раніше, на модульну ділянку ґрунту як об'єкт керування здійснюють вплив змінні збурення – погодні умови (температура і вологість повітря, швидкість вітру, сонячна радіація, опади), – від яких залежить вихідний параметр – всмоктуючий тиск (вологість) ґрунту. Тому можна стверджувати, що даному об'єкту керування притаманна стохастична невизначеність, оскільки його властивості весь час змінюються випадковим чином. Разом з тим, як було показано вище, оцінка таких понять як метеопрогноз опадів передбачає наявність ще й лінгвістичної невизначеності, оскільки на погодних інформерах вказується передбачувана сила опадів у лінгвістичній формі: слабкі опади, короткочасний дощ, злива, гроза. Усі інші метеопараметри вказуються у певному інтервалі на різні періоди доби. Тобто стосовно температури та вологості повітря доцільніше говорити про певне середнє очікуване значення, яке потрапляє у діапазон «висока (температура)», «середня», «низька» тощо. Разом із тим існує складність у врахуванні усіх збурень, що діють на модульну ділянку ґрунту як об'єкт керування, одночасно.

На даний час, крім класичних нейронних мереж, бурхливо розвиваються гібридні, зокрема, нечіткі нейронні мережі. Нечіткі нейронні мережі або гібридні мережі покликані об'єднати в собі переваги нейронних мереж і систем нечіткого виведення [21; 93]. З одного боку, вони дозволяють розробляти і представляти моделі систем у формі правил нечітких продукцій, які володіють наочністю і простотою змістовної інтерпретації. З іншого боку, для побудови правил нечітких продукцій використовуються методи нейронних мереж, що являється зручним і менш трудоемним процесом. Останнім часом апарат гібридних мереж визнається спеціалістами як один із найбільш перспективних для рішення слабо або погано структурованих задач прикладного системного аналізу. Структура нечіткої нейронної мережі на базі алгоритма Сугено наведено на рис. 2.12. Основним недоліком адаптивних нейро-нечітких мереж являються їх громіздкість і низька швидкість збіжності алгоритмів навчання,

що вимагає великих за об'ємом навчальних вибірок даних [100; 111; 127]. З метою подолання вище наведених недоліків нейро-нечітких систем в японськими вченими Yamakawa T., Uchino E., Miki T., Kusanagi H. було введено нео-фаззі (neo-fuzzy) нейрон, подібний за архітектурою до n-входового формального нейрона [115; 135]. Його структура показана на рис. 2.13.

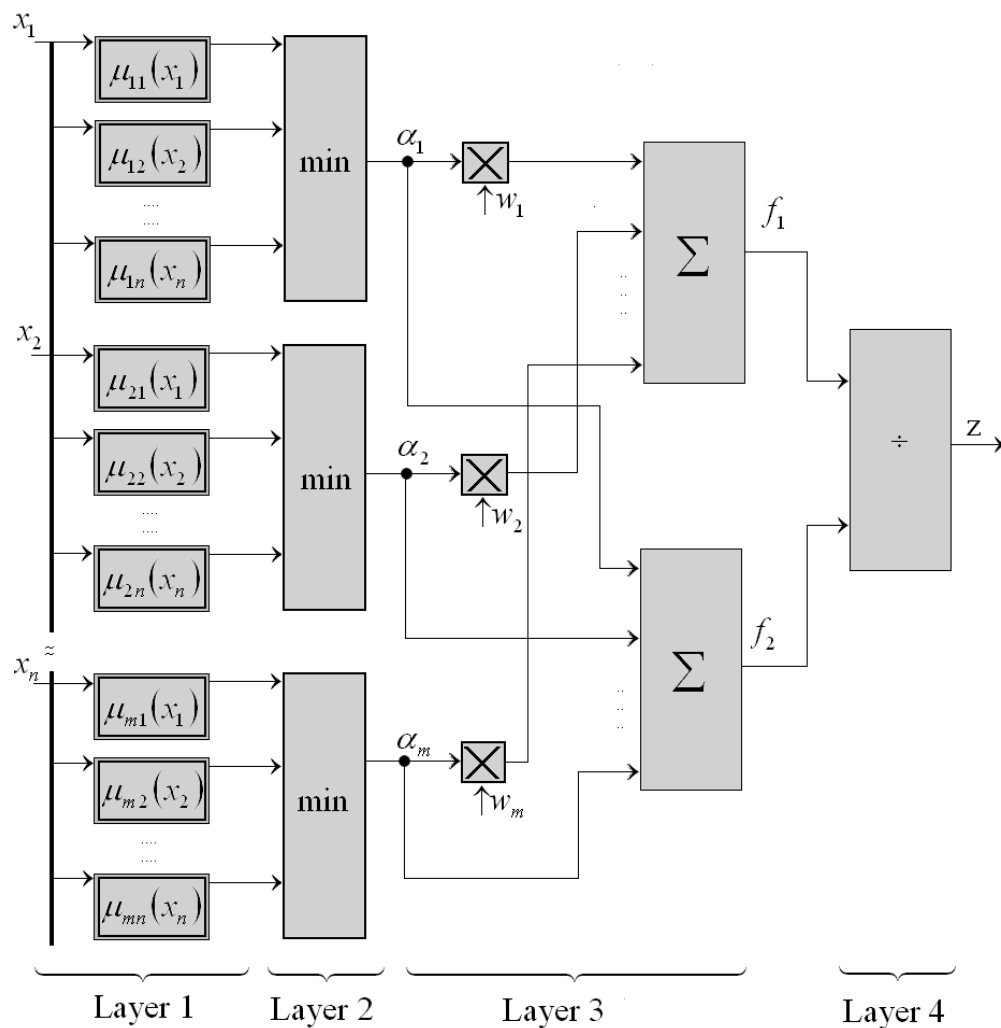


Рисунок 2.12 – Нечітка нейронна мережа на базі алгоритма Сугено

Замість звичайних синаптичних ваг нео-фаззі нейрон містить нелінійні синапси $NS_i, i=1, 2, \dots, n$, утворені набором трикутних симетричних рівномірно розподілених на інтервалі $[0, 1]$ функцій належності $\mu_{ji}, j=1, 2, \dots, m$, з кожною з яких зв'язана власна налаштовувана вага w_{ji} . Вихідна реакція нео-фаззі

нейрона на вхідний вектор даних – $x(k) = (x_1(k), x_2(k) \dots x_n(k))^T$, $k=1, 2 \dots N$ – може бути представлена у вигляді:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i(k)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) \cdot w_{ji}(k), \quad (2.3)$$

де $w_{ji}(k)$ - поточне значення синаптичної ваги, що налаштовується, у момент часу k при j -й функції належності i -ї компоненти вхідного сигналу.

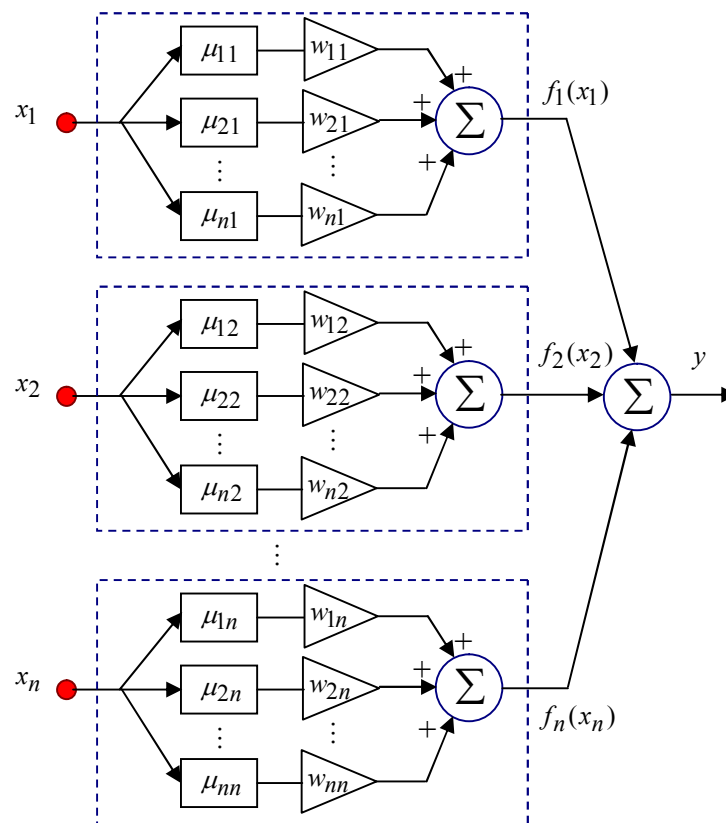


Рисунок 2.13 – Структура нео-фаззі нейрона

У якості критерію навчання нео-фаззі нейрона використовується стандартна квадратична помилка:

$$E(k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e^2(k) = \frac{1}{2} \left(d(k) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) \cdot w_{ji} \right)^2, \quad (2.4)$$

мінімізація якої за допомогою градієнтної процедури веде до алгоритму навчання:

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta \cdot e(k) \cdot \mu_{ji}(x_i(k)), \quad (2.5)$$

де $d(k)$ - зовнішній навчальний сигнал;

η - параметр кроку пошуку, що вибирається із емпіричних міркувань і визначає швидкість збіжності процесу навчання.

Центри трикутних функцій належності μ_{ji} розташовані так, щоб забезпечити так зване розбиття Руспіні, тобто:

$$\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.6)$$

що дозволяє не вводити прихований шар нейронів для нормалізації входів, який зазвичай присутній у нейро-фаззі системах. Внаслідок розбиття Руспіні на кожному кроці навчання активуються тільки дві сусідні функції належності. Вигляд трикутних функцій належності нео-фаззі нейрона показано на рис. 2.14.

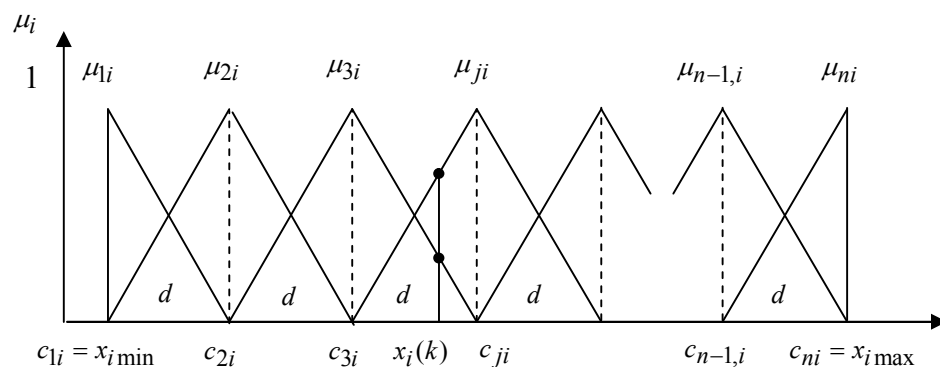


Рисунок 2.14 – Трикутні функції належності нео-фаззі нейрона

Як бачимо, кожна змінна розбивається на n рівних інтервалів від свого мінімального до максимального значення. Значення функції належності змінної x_i визначаємо за залежністю:

$$\mu_{ji} = \begin{cases} \frac{x_i - c_{j-1,i}}{c_{ji} - c_{j-1,i}}, x \in [c_{j-1,i}, c_{ji}], \\ \frac{c_{j+1,i} - x_i}{c_{j+1,i} - c_{ji}}, x \in [c_{ji}, c_{j+1,i}], \\ 0 - \text{у інших випадках.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Для покращення апроксимаційних властивостей у роботі [95] було запропоновано конструкцію подвійного нео-фаззі нейрона, архітектура якого наведена на рис. 2.15.

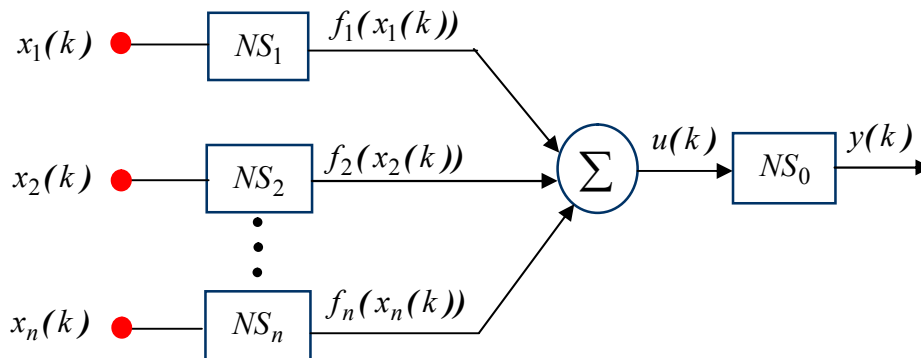


Рисунок 2.15 – Архітектура подвійного нео-фаззі нейрона

Перший шар подвійного нео-фаззі нейрона утворений n нелінійними синапсами NS_i з m_i функціями належності і синаптичними вагами кожен. Вихідний шар утворений нелінійним синапсом NS_0 з m_0 функціями належності μ_{l0} , $l=1,2,\dots,m_0$ і синаптичними вагами w_{l0} .

При подачі на вхід подвійного нео-фаззі нейрона вхідного вектора $x(k)$ на його виході з'являється сигнал

$$\begin{aligned} y(k) &= f_0(u(k)) = \\ &= f_0\left(\sum_{i=1}^n f_i(x_i(k))\right) = \sum_{l=1}^{m_0} \mu_{l0}(u(k)) \cdot w_{l0} = \sum_{l=1}^{m_0} \mu_{l0}\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) \cdot w_{ji}\right) \cdot w_{l0}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Отже, значення вихідного сигналу подвійного нео-фаззі нейрона визначається як значеннями компонент вхідного вектора $x_i(k)$, так і значеннями функцій належності і відповідних синаптичних ваг.

З врахуванням усього вище сказаного для моделювання ненасиченої зони ґрунту застосуємо гібридну нейро-нечітку мережу на основі нео-фаззі нейрона. Для цього сформуємо навчальну і тестувальну вибірки дані по 173 точок у кожній за два різні вегетаційні періоди. На основі нео-фаззі нейрона (2.3) для різних шарів ґрунту (0-10, 10-20 та 30-40 см) створимо моделі виду:

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h)$$

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), рівень ґрунтових вод L від світлової поверхні (м); вихідним параметром є всмоктуючий тиск W^h (м) у визначеному шарі ґрунту h ; $NN()$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок.

При цьому розіб'ємо кожну змінну на 6 рівних інтервалів (рис.2.16-2.19) з трикутними функціями належності, які задовольняють вимозі (2.6). Програмне забезпечення для навчання та тестування нео-фаззі моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту розроблено мовою C++. Вікно форми програми представлено на рис. 2.20. У таблиці 2.6 наведено дані середньоквадратичного відхилення (СКВ) при навчанні та тестуванні моделей для різних шарів ґрунту у порівнянні з експериментальними даними.

Таблиця 2.6 – Результати роботи нео-фаззі моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту

| Шар ґрунту | Кількість точок | СКВ, м вод. ст. | |
|------------|-----------------|-----------------|------------|
| | | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 173 | 0.8268 | 1.036 |
| h=10-20 см | | 0.625 | 0.6956 |
| h=30-40 см | | 0.3093 | 0.2819 |

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=0-10$ см:

$w_P = 0,5616; 0,5598; 0,07069; 0,9815; 0,3413; 0;$

$w_D = 0,276; 0,1994; 0,228; 0,2528; 0,2699; 0;$

$w_L = 0; 0,1771; -0,04447; 0,0601; 0,0005044; 0;$

$w_{W1} = 0,009148; 0,05383; 0,07863; -0,09195; -0,1702; 0;$

$w_{W2} = -0,7824; -0,6217; -0,4078; -0,2407; 0,1926; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=10-20$ см:

$w_P = 0,06096; 0,06963; -0,03156; 0,1927; 0,004078; 0;$

$w_D = -0,09168; 0,07213; 0,06424; 0,093; 0,09745; 0;$

$w_L = 0; -0,0379; -0,007561; 0,03478; -0,006978; 0;$

$w_{W1} = 0,2713; 0,2281; 0,1981; 0,05589; -0,1361; 0;$

$w_{W2} = -0,404; -0,1469; 0,083; 0,3249; 0,7602; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=30-40$ см:

$w_P = 0,05596; 0,05226; 0,02114; 0,04946; 0,05117; 0;$

$w_D = 0,0008974; 0,03379; 0,03179; 0,04337; 0,04698; 0;$

$w_L = 0; -0,07954; -0,04592; -0,005366; -0,002678; 0;$

$w_{W1} = 0,09041; 0,1252; 0,04392; 0,1562; 0; 0;$

$w_{W2} = -0,1475; -0,0005958; 0,2592; 0,3046; 0; 0.$

Згідно з даними, наведеними у таблиці 2.1, всмоктуючий тиск, який відповідає нижній межі оптимальної вологості, при вирощуванні багаторічних трав на різних фазах їх розвитку коливається у межах 1-3.5 м вод. ст. (0.1-0.35 атм). Згідно таблиці результатів роботи мережі 2.7, максимальне значення СКВ складає 1.036 м вод. ст. Приріст всмоктуючого тиску ґрунту ± 1.036 м вод. ст. згідно основної гідрофізичної характеристики відповідає приросту об'ємної вологості ґрунту $\pm (2-4)\%$ в межах робочого діапазону. Максимальний діапазон вологості складає (21-43)% об'ємних, або (0-7) м вод. ст. всмоктуючого тиску для ґрунтів суглинистого та супіщаного складу.

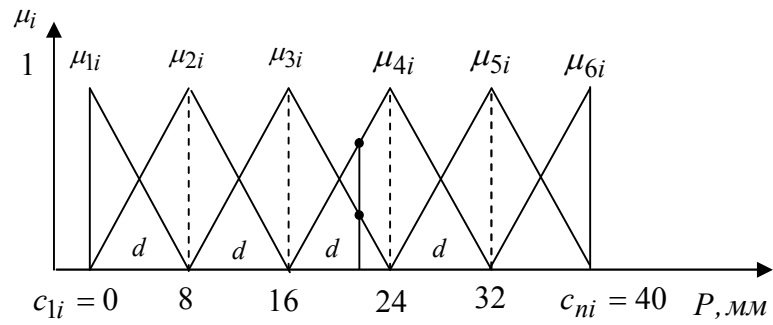


Рисунок 2.16 – Функції належності вхідної змінної «кількість опадів»

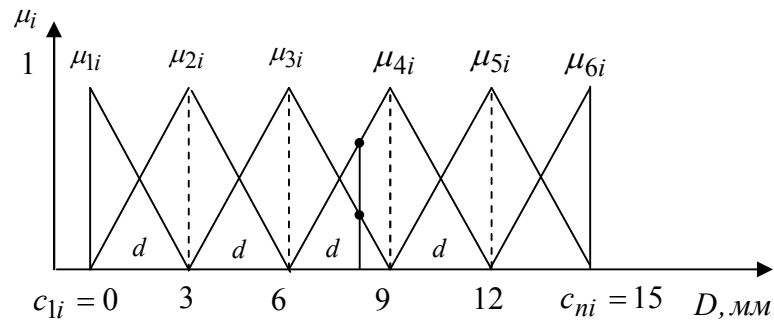


Рисунок 2.17 – Функції належності вхідної змінної «дефіцит вологості повітря»

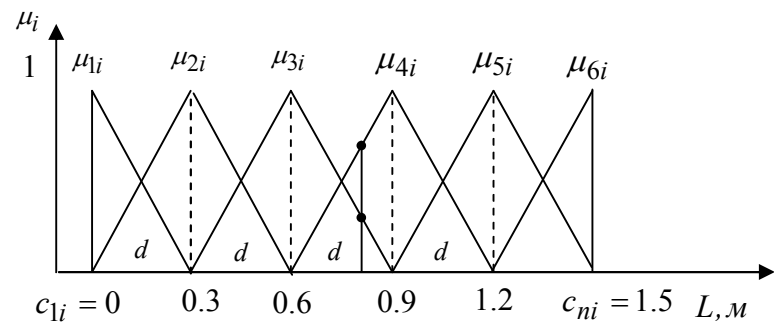


Рисунок 2.18 – Функції належності вхідної змінної «РГВ»

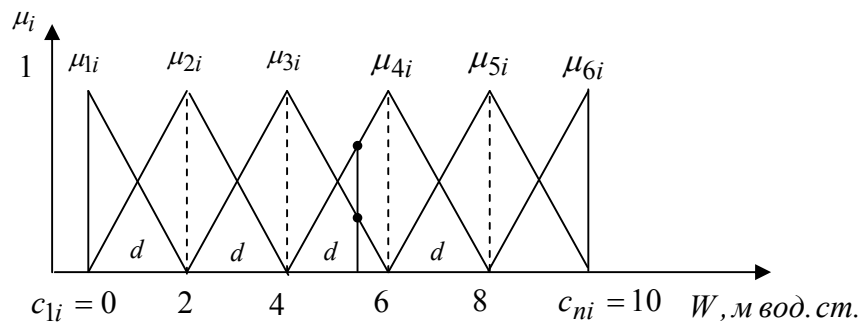


Рисунок 2.19 – Функції належності вихідної змінної «всмоктуючий тиск ґрунту»

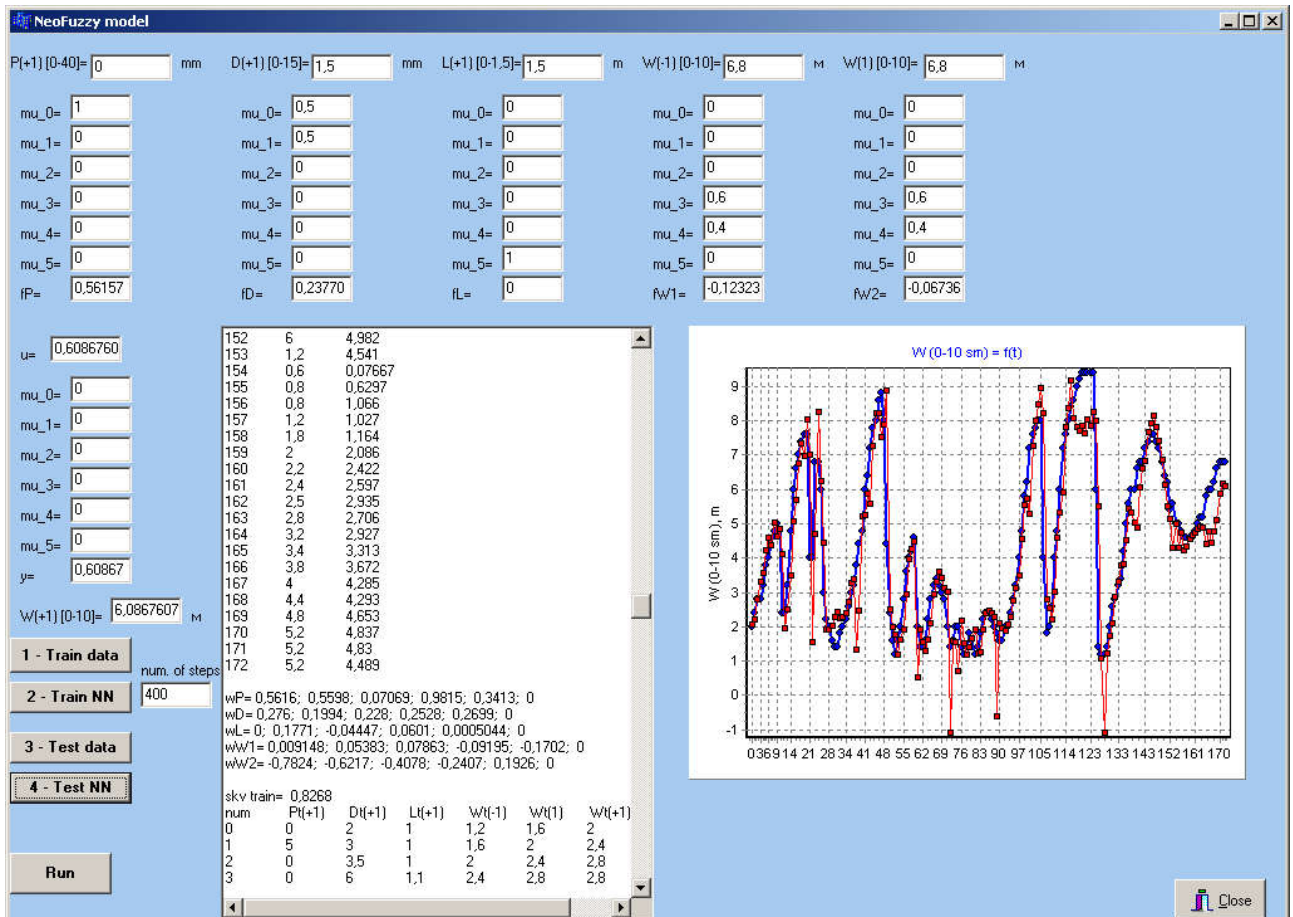


Рисунок 2.20 – Вікно форми програми навчання і тестування нео-фаззі мереж

При керуванні всмоктуючим тиском (вологістю) ґрунту достатньо забезпечити точність $\pm(5)\%$ об'ємної вологості.

Виконаємо розрахунок для перевірки адекватності отриманих моделей. Для цього використаємо критерій Фішера. F-критерій Фішера являється параметричним критерієм і використовується для порівняння дисперсій двох варіаційних рядів [104]. Емпіричне значення критерію визначається за формулою:

$$F_{емп.} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (2.9)$$

де σ_1^2 - більша дисперсія,

σ_2^2 - менша дисперсія варіаційних рядів, що розглядаються.

Якщо обраховане значення критерію F більше за критичне для певного рівня значимості і відповідних чисел ступенів свободи для чисельника та знаменника, то дисперсії вважаються різними. Іншими словами, перевіряється гіпотеза про те, чи генеральні дисперсії числових рядів рівні між собою: $H_0 = \{D_x = D_y\}$. Критичне значення критерію Фішера визначається за спеціальною таблицею або за певними функціями у спеціалізованому програмному забезпеченні, наприклад Microsoft Excel, виходячи з рівня значимості α і ступенів свободи чисельника і знаменника. Число ступенів свободи чисельника визначається за формулою:

$$v_1 = n_1 - 1, \quad (2.10)$$

де n_1 - число варіант для більшої дисперсії.

Число ступенів свободи знаменника визначається за формулою:

$$v_2 = n_2 - 1, \quad (2.11)$$

де n_2 - число варіант для меншої дисперсії.

Дисперсія у статистиці визначається як середньоквадратичне відхилення індивідуальних значень ознаки від середнього арифметичного. Виконаємо розрахунок F-критерію Фішера у програмі Microsoft Excel при рівні значимості $\alpha = 0.05$. Результати розрахунків наведено у таблицях 2.7-2.9.

Для моделей визначення всмоктуючого тиску у всіх трьох шарах ґрунту виконується нерівність $F_{емп.} < F_{кр.}$ як при навчанні, так і при тестуванні моделей. Тому нульова гіпотеза про рівність генеральних дисперсій на рівні значимості 0.05 приймається, і розроблені моделі є адекватними.

Графіки результатів роботи нео-фаззі моделей на незалежних тестувальних вибірках даних для прогнозуванні всмоктуючого тиску ґрунту у різних шарах ґрунту на рис. 2.21.

Таблиця 2.7 – Нео-фаззі модель визначення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 0-10 см

| Показник | W(+1) | Wneuro(+1)_train | Wt(+1) | Wneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 3.904 | 3.871 | 4.466 | 4.289 |
| Дисперсія | 6.348 | 5.308 | 5.745 | 5.599 |
| Спостереження | 173.000 | 173.000 | 173.000 | 173.000 |
| df | 172.000 | 172.000 | 172.000 | 172.000 |
| F | 1.196 | | 1.026 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.121 | | 0.433 | |
| F критичне | 1.286 | | 1.286 | |

Таблиця 2.8 – Нео-фаззі модель визначення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 10-20 см

| Показник | W(+1) | Wneuro(+1)_train | Wt(+1) | Wneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 3.597 | 3.628 | 3.708 | 3.707 |
| Дисперсія | 4.563 | 4.149 | 3.771 | 3.309 |
| Спостереження | 193.000 | 193.000 | 173.000 | 173.000 |
| df | 192.000 | 192.000 | 172.000 | 172.000 |
| F | 1.100 | | 1.140 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.255 | | 0.196 | |
| F критичне | 1.269 | | 1.286 | |

Таблиця 2.9 – Нео-фаззі модель визначення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 30-40 см

| Показник | W(+1) | Wneuro(+1)_train | Wt(+1) | Wneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 2.327 | 2.353 | 1.954 | 2.007 |
| Дисперсія | 1.076 | 0.972 | 1.002 | 0.956 |
| Спостереження | 173.000 | 173.000 | 173.000 | 173.000 |
| df | 172.000 | 172.000 | 172.000 | 172.000 |
| F | 1.106 | | 1.049 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.254 | | 0.378 | |
| F критичне | 1.286 | | 1.286 | |

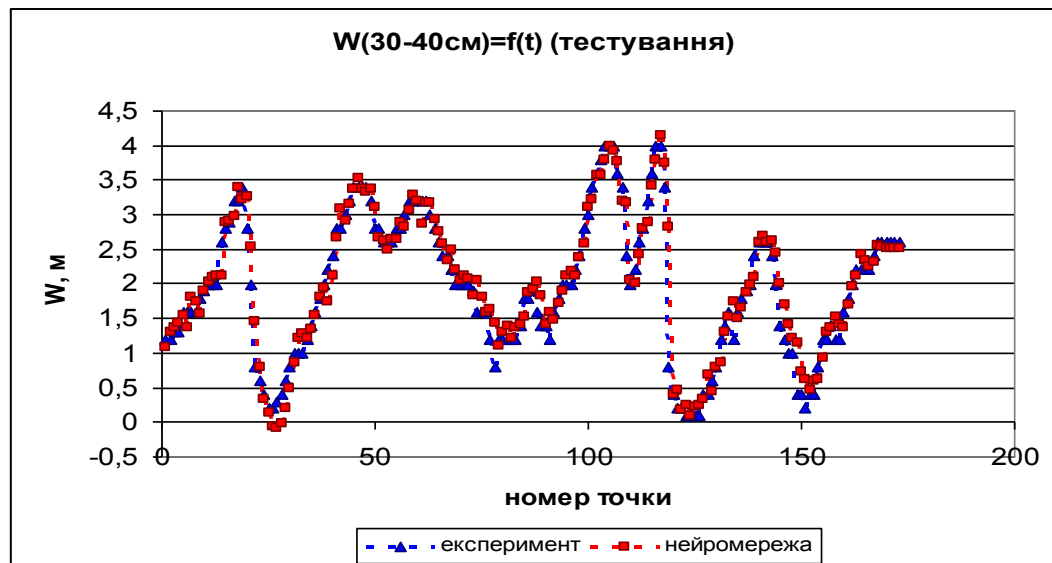
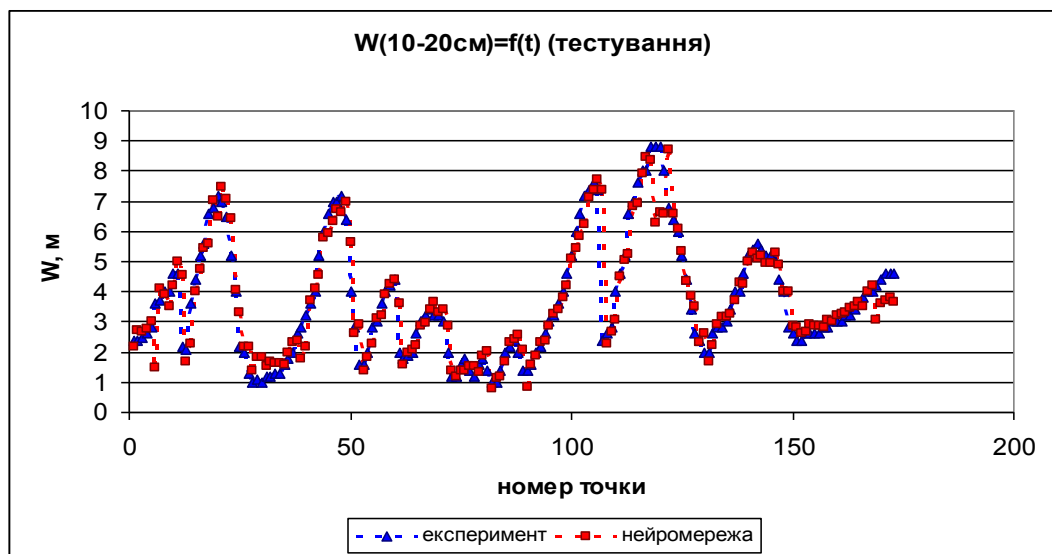
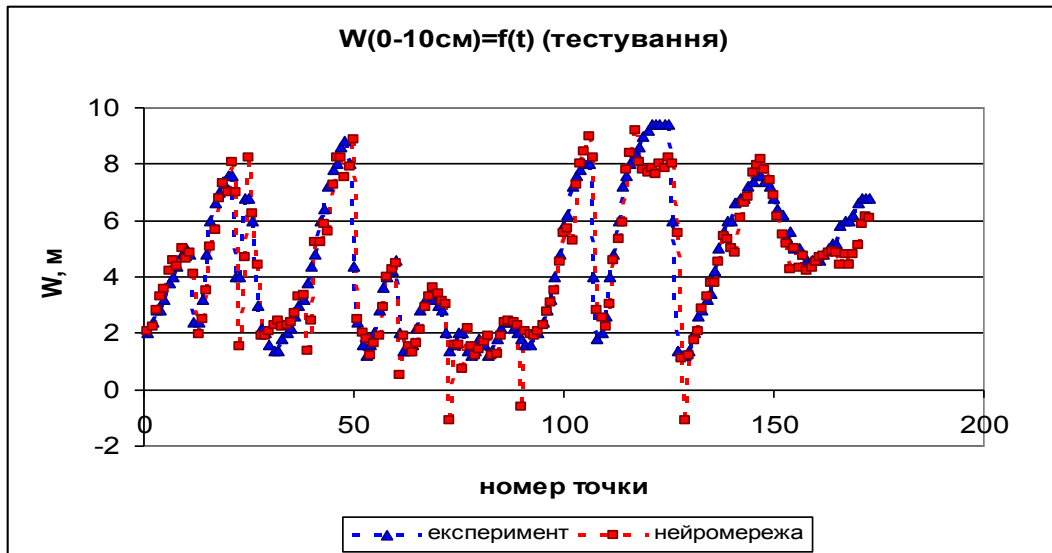


Рисунок 2.21 – Результати роботи нео-фаззі моделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту у різних шарах (0-10 см, 10-20 см, 30-40 см): 1 – експериментальні дані, 2 – результати роботи нейромережі

Розроблені нео-фаззі моделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту забезпечують вищу точність роботи, ніж багатошарові мережі прямого поширення. Водночас вони мають простішу архітектуру, що забезпечує легшу практичну реалізацію та більшу швидкість навчання. Розроблені нео-фаззі моделі використано у складі автоматизованого робочого місця диспетчера осушувально-зволожувальної системи і служать зручним інструментом для планування і керування режимами зволоження сільськогосподарських культур.

2.5 Математичне моделювання ненасиченої зони ґрунту на основі рівняння вологопереносу

2.5.1 Ідентифікація коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейромережевих технологій

При застосуванні диференційного рівняння вологопереносу виникає необхідність визначення коефіцієнтів і функцій, які є параметрами цього рівняння та описують фізичні процеси переносу вологи [76]. До таких функцій відносимо функцію водоутримання або основну гідрофізичну характеристику (ОГХ) – залежність всмоктуючого тиску ґрунту від його вологості $\psi(W)$ - і функцію вологопровідності ненасичених ґрунтів. Говорячи про функцію вологопровідності, розрізняють характеристику вологопровідності, що пов'язує коефіцієнт вологопровідності і потенціал ґрунтової вологи $k(\psi)$ та характеристику, яка пов'язує коефіцієнт вологопровідності ґрунту і його вологість $k(W)$ [29].

Здатність ґрунту проводити воду є важливим показником, необхідним для різних меліоративних розрахунків. Вивченням кількісних закономірностей переміщення вологи в ґрунті займалися вчені: Алпатьєв А.М., Воронін А.Д., Глобус А.М., Муромцев М.О., Роде А.А., Судніцин І.І. та інші [29].

Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків переміщення ґрунтової вологи, що відбувається у природних умовах. До таких випадків переміщення

слід віднести фільтрацію води через ґрунт, надходження вологи від рівня ґрунтових вод до поверхні, поглинання вологи ґрунтом, надходження ґрунтової вологи до коріння рослин.

Універсальною функцією, що відображає вплив усіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є потенціал вологи. Як відомо, вода переміщується завжди від більшого потенціалу до меншого. Діючою силою при цьому є градієнт вільної енергії або потенціалу ґрунтової вологи, що відображає сили, які викликають ізотермічний потік вологи. В ізотермічних умовах складовими потенціалу вологи є: капілярний тиск, осмотичні і гравітаційні сили. Внаслідок цього, гідравлічна провідність ненасичених вологою ґрунтів (капілярна провідність k , м/добу) характеризується не єдиним значенням (як при насиченому вологоперенесенні), а функцією від всмоктуючого тиску $k = k(\psi)$ або від вологості ґрунту $k = k(W)$.

З точки зору вологопровідності ґрунтовий профіль ділиться на дві частини: знизу – область повного насичення, де рух вільної вологи відбувається під впливом сили тяжіння, згідно з законами фільтрації, а зверху – область з рухом вологи у ненасиченому ґрунті. Схема переміщення вологи в ґрунті наведена на рис. 2.22.

Найбільш розповсюдженими методами визначення $k(\psi)$ є експериментальні методи, які базуються на аналізі даних про рух вологи: методи стаціонарного і нестаціонарного потоків. Реалізувати стаціонарний режим потоку не завжди легко з технічної точки зору, а крім того, такі дослідження вимагають значних затрат часу. Нестаціонарні методи потребують менших затрат часу експериментатора у порівнянні зі стаціонарними, але достовірність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови дослідження відповідали цілому ряду теоретичних припущень.

Складна природа залежності ґрунту з водою у вигляді “вологість – потенціал – вологопровідність” найчастіше представляється у вигляді емпіричних формул та графіків. Запропоновано багато емпіричних апроксимаційних формул для функції вологопровідності, які з певною точністю

відтворюють цю функцію на окремих інтервалах . Найбільш відомими є формули Ван-Генухтена (1980), Муалема (1976), Гарднера, Уінстона, К.П. Лудніна, С.Ф. Авер'янова, В.А. Бодрова, А.І. Будаговського.

На даний час актуальною є задача розробки технологій, які забезпечують економічну та екологічну ефективність водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах. У зв'язку з цим необхідним є створення адекватної математичної моделі ґрунту на основі рівняння вологопереносу, одним з основних параметрів якого є коефіцієнт вологопровідності [76; 94].

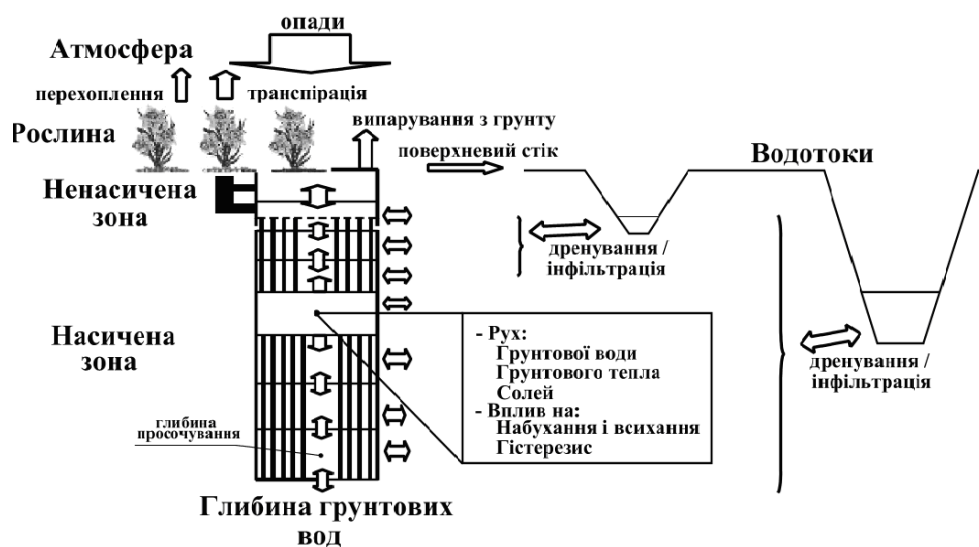


Рисунок 2.22 – Переміщення вологи в ґрунті

Насичене середовище. Кількісна оцінка потоку вологи залежить від того, в яких умовах відбувається її переміщення: в ґрунті, насиченому вологою при повністю заповнених порах водою, або в ґрунті, не насиченому вологою, коли тільки частина пор зайнята водою, а інша частина – повітрям. Закономірності руху вологи в **насичених пористих середовищах**, що відбуваються під дією гідростатичного тиску, можна описати відомим законом Дарсі, в якому швидкість переміщення вологи пропорційна градієнту гідравлічного напору [88; 105]:

$$v = k_f \cdot i, \quad (2.12)$$

де v - швидкість фільтрації,

k_f - коефіцієнт фільтрації,

i - градієнт гідравлічного напору.

В рівнянні (2.12) k_f - деяка постійна величина, що залежить від геометрії пор фільтруючого середовища і характеризує його властивість проводити воду при повному насиченні. Коефіцієнт фільтрації k_f не залежить від вологості ґрунту. Гідравлічний напір є єдиною силою, що викликає рух води в насиченому ґрунті і може бути просто вимірний.

Ненасичене середовище. З переходом від насиченого до ненасиченого ґрунту закономірності, що управляють рівновагою і переміщенням вологи, значно ускладнюються. Характер руху вологи в такому ґрунті суттєво відрізняється від руху рідини в умовах фільтраційного потоку.

Особливості такого руху полягають у тому, що границі потоку не залишаються постійними, а вміст вологи в ґрунті при частковому заповненні пор може бути неоднаковим у різних точках однорідного ґрунту. Вода може переміщуватись не тільки у формі суцільного (об'ємного) потоку, але і в плівках, що покривають поверхню ґрунтових частинок, перетікати, підпорядковуючись капілярному тиску менісків. Ці особливості доводять те, що коефіцієнт вологопровідності може бути змінним як в просторі, так і в часі.

Фізика процесу: залежність коефіцієнта вологопровідності від вологості та потенціалу. Універсальною функцією, що відображає вплив всіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є потенціал вологи. Як відомо, вода (так само як тепло і електричний струм) переміщується завжди від більшого потенціалу до меншого. Діючою силою при цьому буде градієнт вільної енергії або потенціалу ґрунтової вологи, що виражає сили які викликають ізотермічний потік вологи. В ізотермічних умовах складовими потенціалу вологи є: капілярний тиск, осмотичні і гравітаційні сили. Внаслідок цього, гідравлічна провідність ненасичених вологою ґрунтів (капілярна провідність k , см/добу) характеризується не єдиним значенням (як при

насиченому вологопереносі), а обов'язково функцією від всмоктуючого тиску $k=k(\psi_p)$, або від вологості ґрунту $k=k(W)$. Структурну схему модульної ділянки ґрунту як об'єкту керування наведено на рис. 2.23.

Таким чином, якщо припустити, що гідравлічна провідність ґрунту є функцією об'ємного вмісту води в ґрунті $k=k(W)$, то рух води у **ненасичених ґрунтах** також відбувається згідно закону Дарсі [88]:

$$q = -k(W) \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (2.13)$$

де q -об'єм води (щільність потоку), що протікає за одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу ґрунту на глибині z , м³/добу;

Φ - повний потенціал ґрунтової води, $\Phi = -\psi_p + \psi_g$, м.в.ст., за умови, що вісь z направлена вниз;

ψ_p – капілярно-сорбційний тиск, м.в.ст.;

ψ_g – гравітаційний тиск, м.в.ст.

На величину коефіцієнта вологопровідності k впливає багато факторів: механічний і агрегатний склад, структура, вологість, всмоктуючий тиск (потенціал) ґрунту. У зв'язку з цим теоретичні методи визначення k на даний момент відсутні, його значення визначається розрахунковим шляхом за даними спеціальних дослідів і спостережень. Найбільш розповсюдженими методами визначення k є методи, основані на аналізі даних про рух води: методи стаціонарного потоку і методи нестаціонарного потоку. Ці методи прості, але їх використання обмежується вузьким інтервалом значень величини k . Крім того, основним їх недоліком є тривалість експерименту, яка квадратично зростає із довжиною зразка – моноліту ґрунту. Методи реалізуються за допомогою потокомірів і колон. На даний час широке застосування мають чисельні емпіричні формули визначення k , найбільш відомими з яких є такі: ван Генухтена, Уінстона, Гарднера, Ликова А.В., Голованова А.І., Авер'янова С.Ф. тощо. Для використання даних формул необхідно мати ряд додаткової

інформації про фізико-механічні та водно-фізичні властивості ґрунту, отримання якої ускладнено проведенням багаточисельних додаткових експериментів.

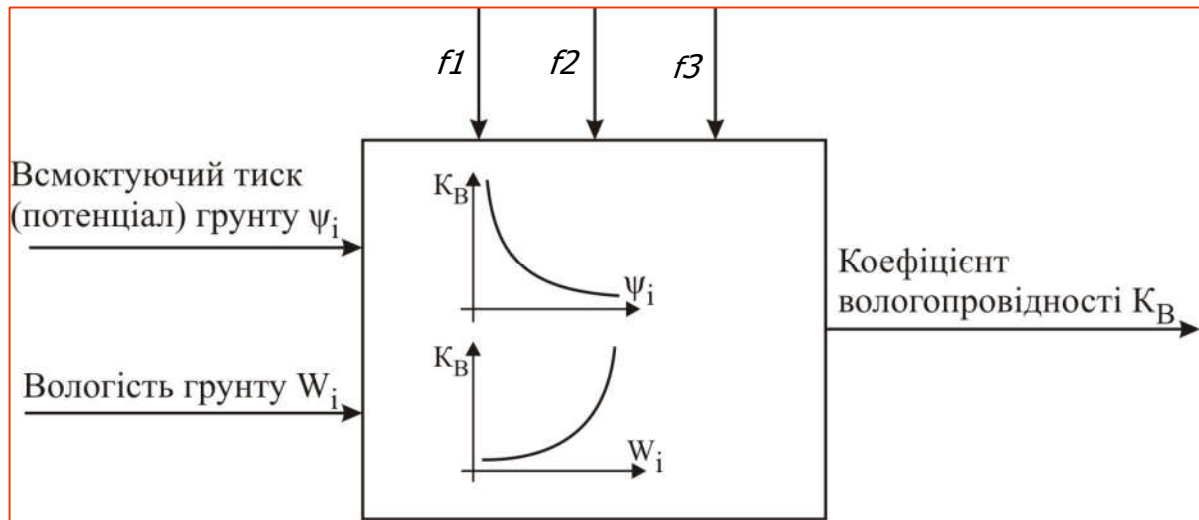


Рисунок 2.23 – Структурна схема модульної ділянки ґрунту як об'єкту керування: f_1 , f_2 – механічний і агрегатний склад відповідно, f_3 – структура ґрунту

Розрахунок коефіцієнта вологопровідності за аналітичними формулами. До основних гідрофізичних характеристик ґрунтів належать залежність всмоктуючого тиску від об'ємної вологості ґрунту, залежність коефіцієнта вологопровідності від всмоктуючого тиску ґрунту, залежність коефіцієнта вологопровідності від об'ємної вологості ґрунту. Основні гідрофізичні характеристики для суглинистих ґрунтів Рівненської дослідної ОЗС, побудовані на основі експериментальних даних, наведені у додатку Д. Схему розподілу шару ґрунту на зони наведено на рис. 2.24.

Розрахуємо коефіцієнт вологопровідності ґрунту, використовуючи емпіричні формули, та порівняємо розрахункові значення із дослідними [29].

В основі розрахунку коефіцієнта вологопровідності $k_{вл}$ лежать уявлення про протікання води по системі капілярів різного діаметру, що перетинаються та підпорядковуються закону Пуазейля [68]. Передбачають, що капіляри перетинаються випадковим чином, згідно теорії ймовірності, а частка капілярів

кожного діаметру у загальному об'ємі пор визначається основною гідрофізичною характеристикою ґрунту.

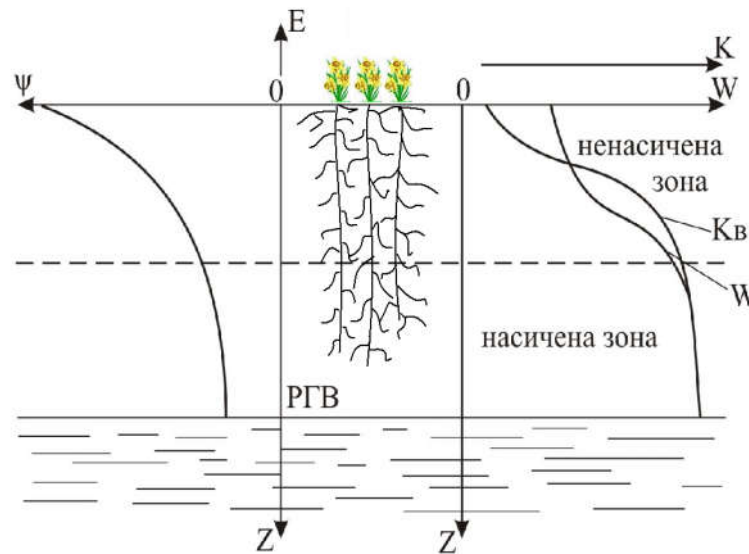


Рисунок 2.24 – Розподіл шару ґрунту на зони

Муалем [116], узагальнивши теоретичні методи розрахунку $k_{вл.}$, вивів рівняння, що пов'язує коефіцієнт вологопровідності з об'ємною вологістю ґрунту θ і тиском води P :

$$\frac{k_{вл.}(\theta)}{k_f} = S_e^{1/2} \cdot \left(\frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{P}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{P}} \right)^2 \quad (2.14)$$

де θ_s - вологість насиченого ґрунту, $\text{м}^3/\text{м}^3$,

θ_r - мінімальна вологість ґрунту, $\text{м}^3/\text{м}^3$,

S_e - ступінь насичення ґрунту ($0 \leq S_e \leq 1$), рівна:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.15)$$

Інтегрування виразу у правій частині рівняння (2.14) по табульованим парам значень (θ, P) представляє труднощі, тому на практиці гідрофізичні характеристики ґрунту представляють у вигляді математичних залежностей, що

пов'язують вологість ґрунту з тиском ґрунтової води. Таке представлення зручно для порівняння та інтерполяції вимірних величин, оскільки моделі мають обмежене число параметрів. Найбільше поширення отримали апроксимаційні залежності основної гідрофізичної характеристики (ОГХ) Брукса і Корі [97]:

$$S_e = \begin{cases} (\alpha P)^{-\lambda} & (\alpha P > 1) \\ 1 & (\alpha P \leq 1) \end{cases} \quad (2.16)$$

та ван Генухтена [129]:

$$S_e = \left[1 + (\alpha \cdot P)^n \right]^{-m} \quad (2.17)$$

де $m = 1 - \frac{1}{n}$, α , [1/м], n , λ - емпіричні коефіцієнти.

Підставляючи формули (2.16) та (2.17) у рівняння Муалема (2.15), можна виразити $k_{вл.}$ через ступінь насичення S_e для моделі Брукса і Корі:

$$k_{вл.} = k_f S_e^{5/2+2/\lambda} \quad (2.18)$$

і моделі ван Генухтена:

$$k_{вл.} = k_f S_e^{1/2} \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (2.19)$$

У модель ван Генухтена вводять також ще один додатковий емпіричний коефіцієнт для покращення апроксимаційних властивостей, тоді формула (2.19) набуде вигляду:

$$k_{вл.} = k_f S_e^\lambda \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (2.20)$$

Розглянемо ще одні емпіричні залежності для визначення коефіцієнта вологопровідності: Уінстона та Авер'янова. Формула Уінстона:

$$k_{вл.} = k_f \cdot \left(\frac{1}{\psi} \right)^m, \quad (2.21)$$

де ψ - всмоктуючий тиск (потенціал) ґрунту,

k_f - коефіцієнт фільтрації,

m - емпіричний коефіцієнт.

Формула Авер'янова С.Ф.:

$$k_{вл.} = k_f \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^m \quad (2.22)$$

де k_f - коефіцієнт фільтрації м/добу,

θ - об'ємна вологість ґрунту, м³/м³,

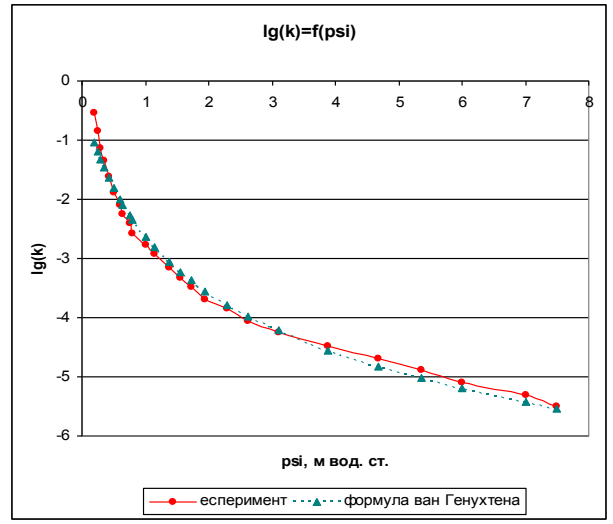
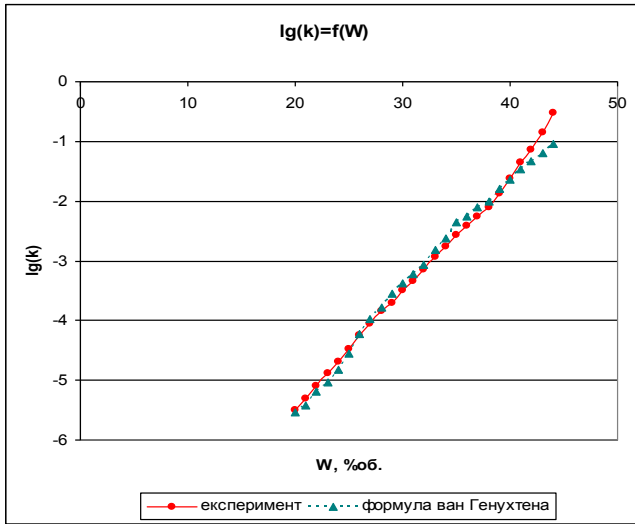
θ_r - мінімальна вологість ґрунту, м³/м³,

θ_s - вологість насиченого ґрунту, м³/м³,

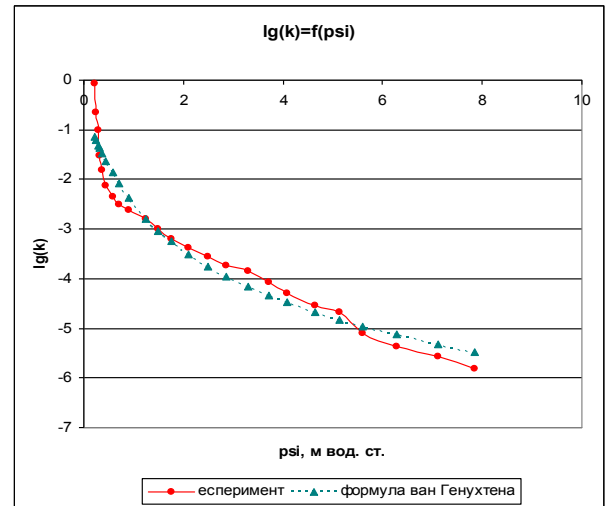
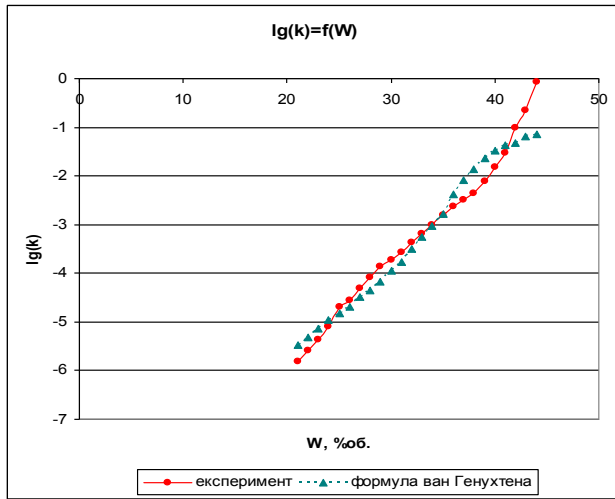
m - емпіричний коефіцієнт.

Апроксимуємо основні гідрофізичні характеристики ґрунту вище наведеними емпіричними залежностями, підібравши при цьому значення емпіричних коефіцієнтів. Результати апроксимацій наведено у таблицях 2.10-2.14. Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту наведено на рис. 2.25-2.28. Як бачимо з таблиці 2.14, найкращі результати апроксимації основних гідрофізичних характеристик ґрунту дають емпіричні формули Брукса і Корі та ван Генухтена.

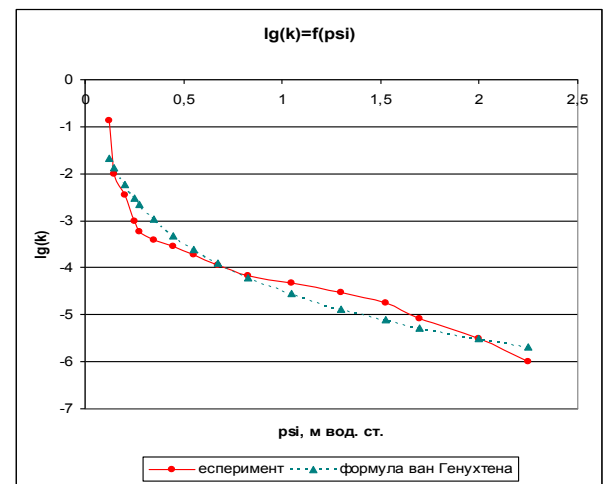
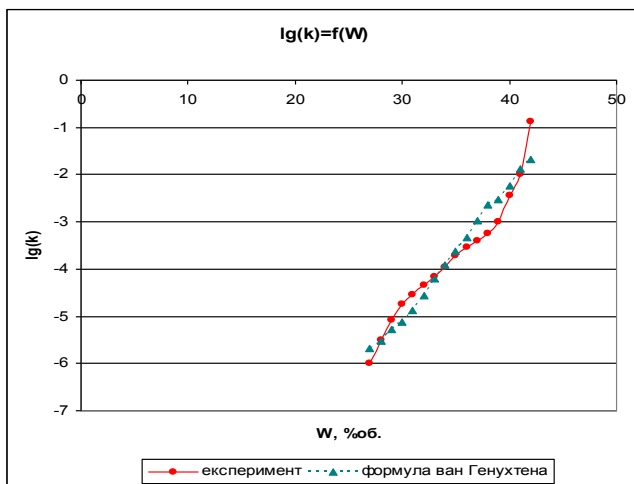
Розробимо альтернативну модель для розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту k на базі нейронних мереж. Для цього створимо мережу виду:



h=0.05-0.3 м

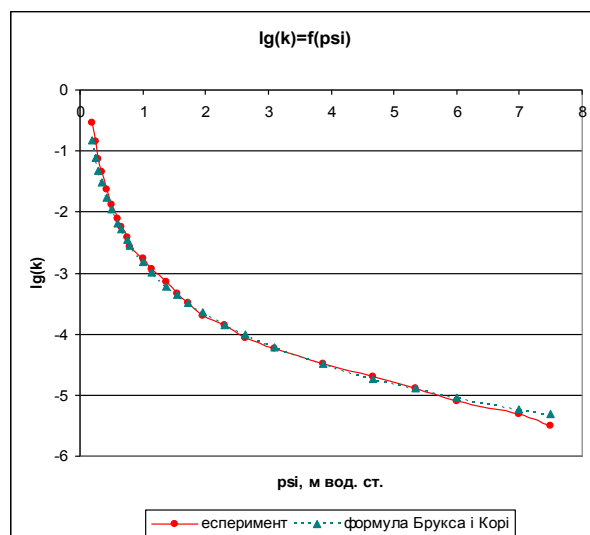
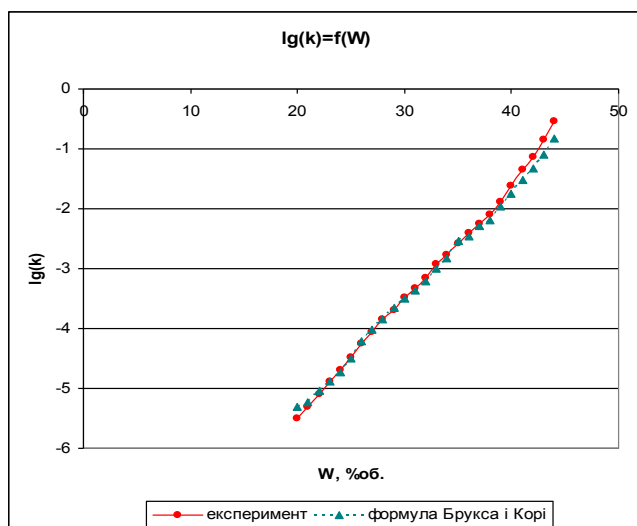


h=0.4-0.7 м

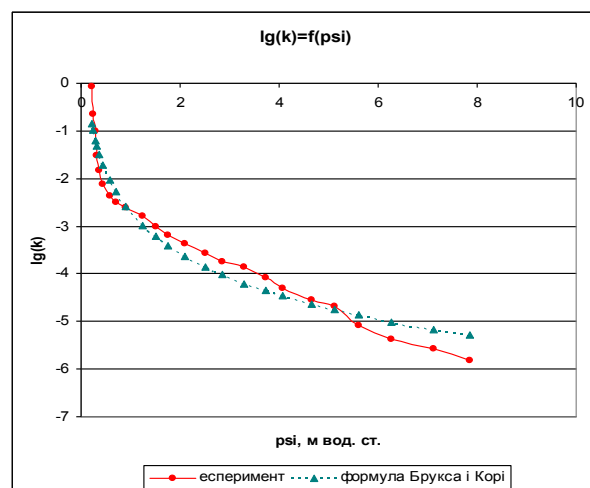
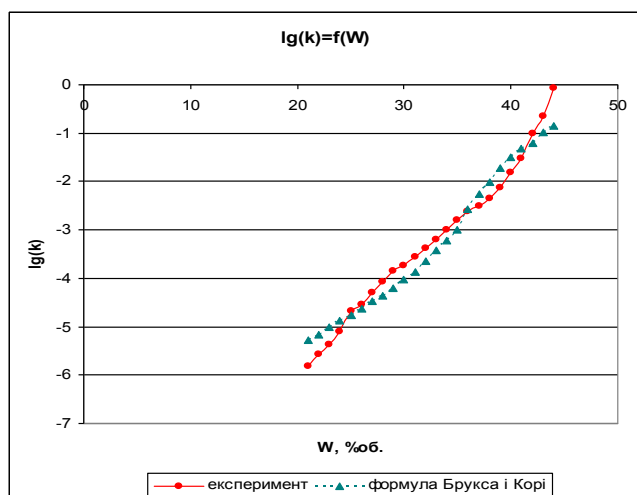


h=0.8-1.5 м

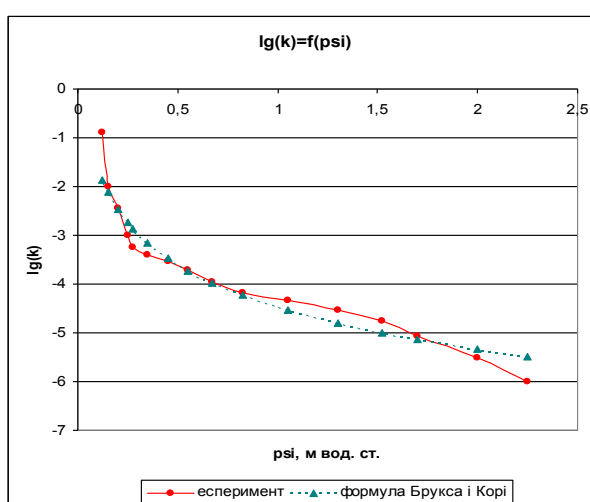
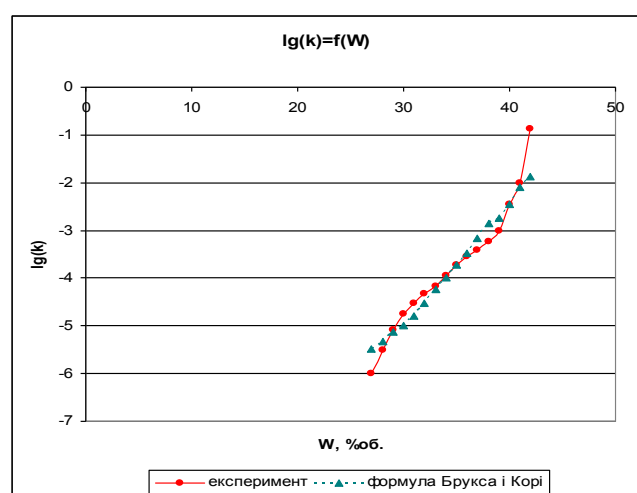
Рисунок 2.25 – Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за формулою ван Генухтена



$h=0.05-0.3$ м

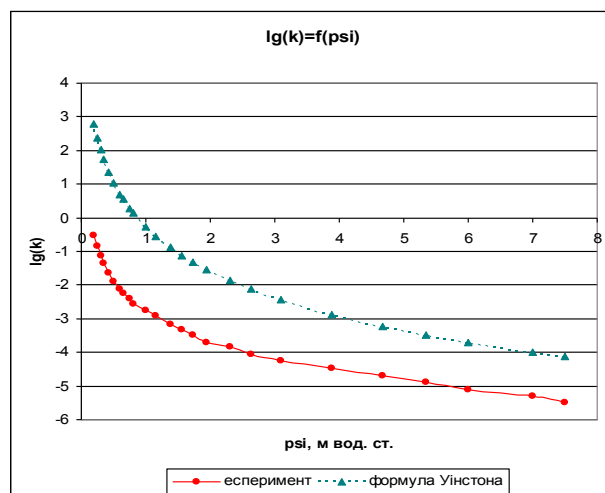
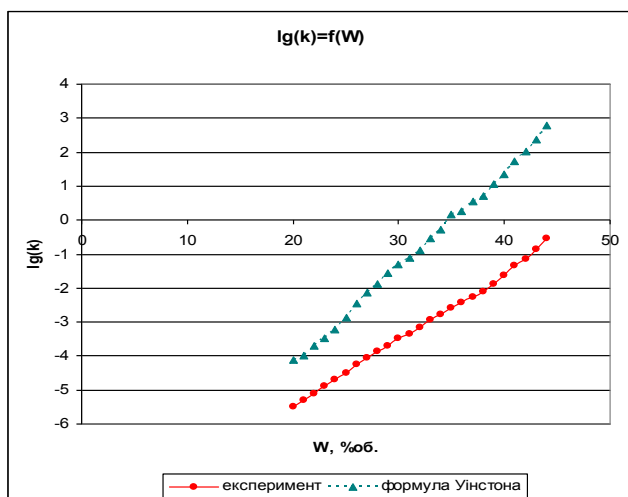


$h=0.4-0.7$ м

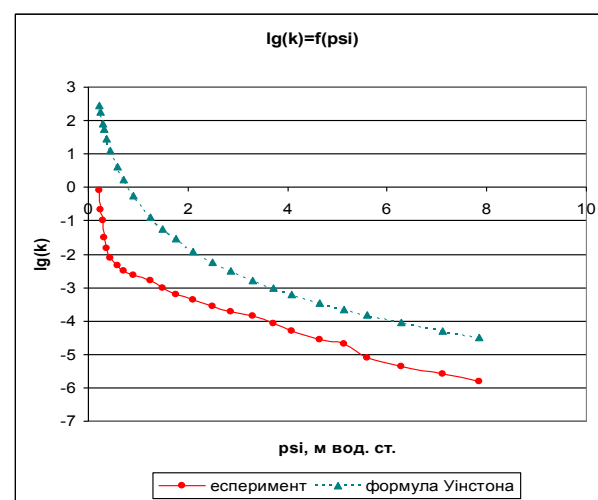
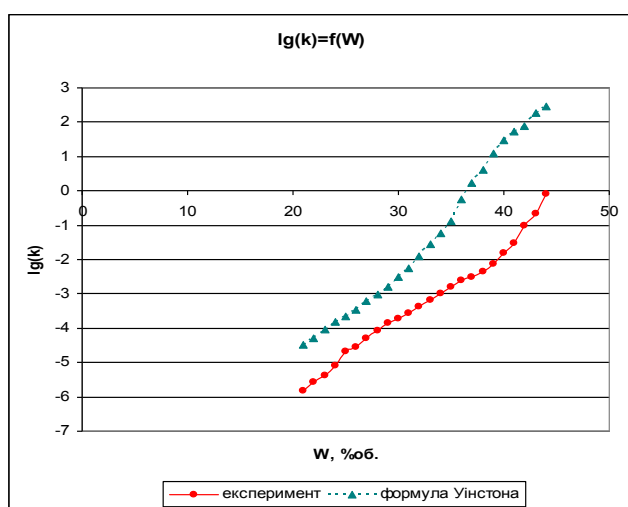


$h=0.8-1.5$ м

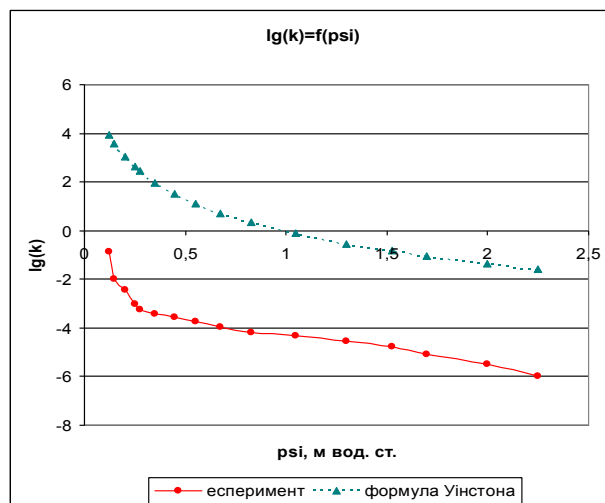
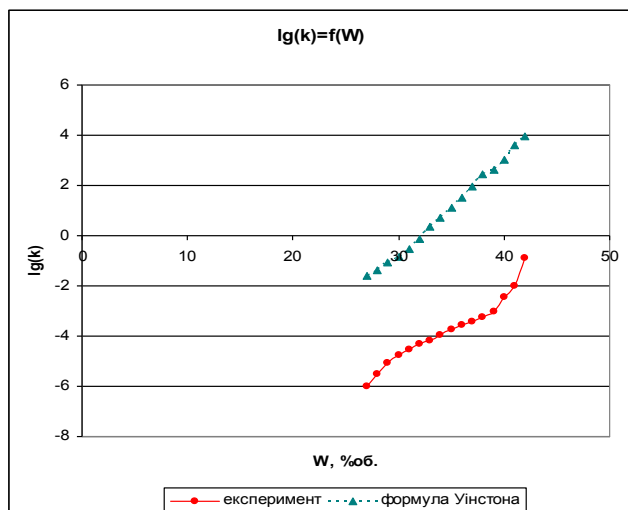
Рисунок 2.26 – Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за формулою Брукса і Корі



$h=0.05-0.3$ м

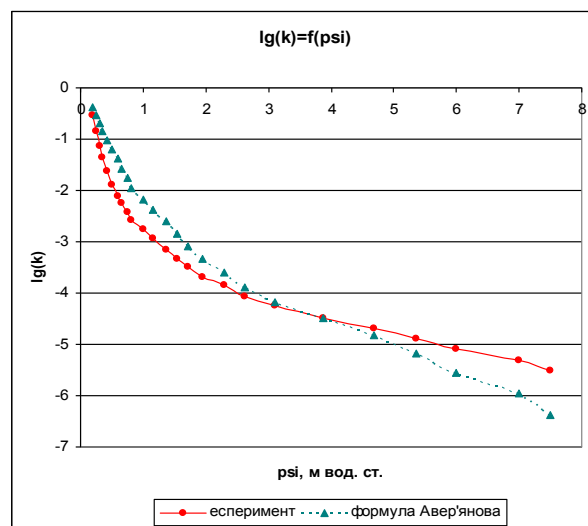
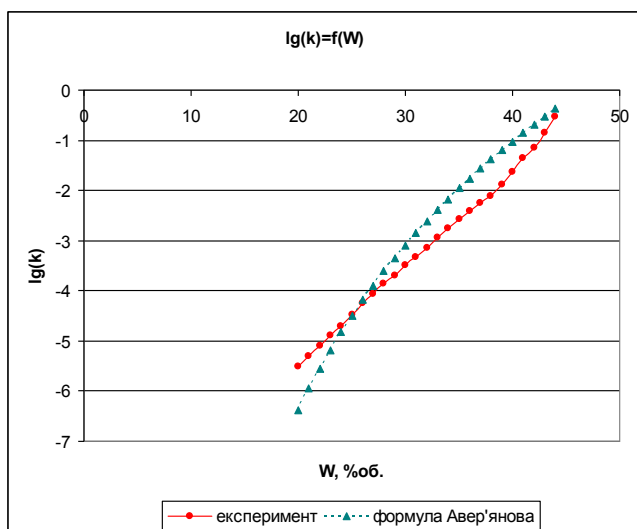


$h=0.4-0.7$ м

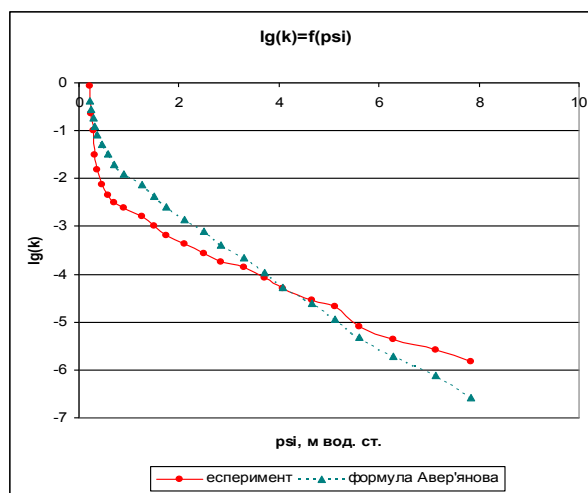
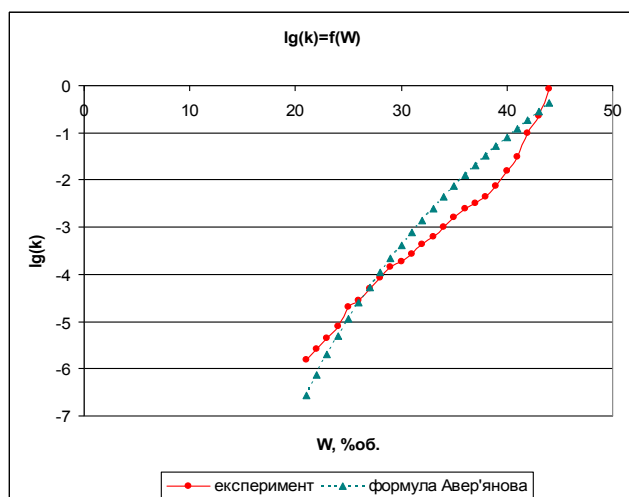


$h=0.8-1.5$ м

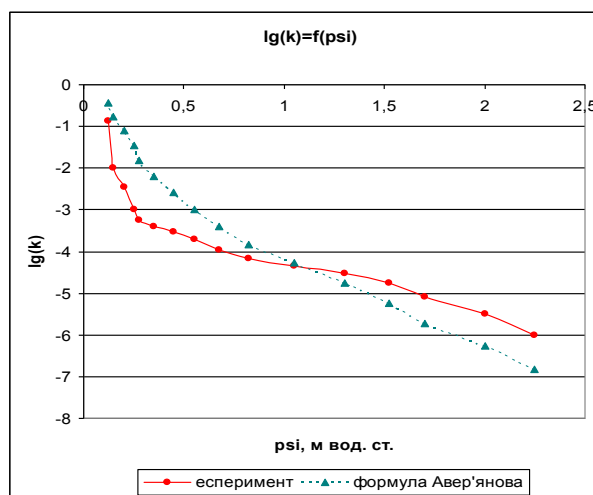
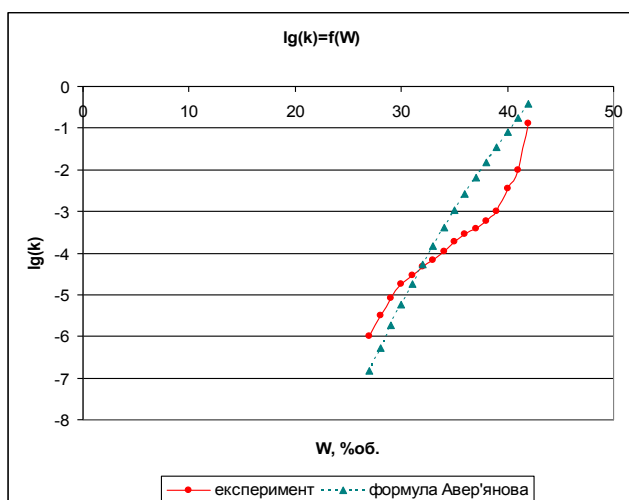
Рисунок 2.27 – Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за формулою Уїнстона



$h=0.05-0.3$ м



$h=0.4-0.7$ м



$h=0.8-1.5$ м

Рисунок 2.28 – Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за формулою Авер'янова

Таблиця 2.10 – Інтервали значень параметрів рівнянь Муалема, ван Генухтена, Брукса і Корі

| Параметр | Одиниця вимірювання | Значення | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------|----------|
| | | Мінімум | Максимум |
| Мінімальна об'ємна вологість ґрунту | $\text{м}^3/\text{м}^3$ | 0 | 0.4 |
| Об'ємна вологість при найменшій вологоємності (граничній польовій вологоємності) | $\text{м}^3/\text{м}^3$ | 0 | 0.95 |
| Коефіцієнт фільтрації | м/добу | 0.0001 | 10 |
| Коефіцієнт α (альфа) | 1/м | 0.01 | 100 |
| Параметр n | - | 1 | 5 |
| Коефіцієнт λ (лямбда) | - | -25 | 25 |

Таблиця 2.11 – Коефіцієнти рівнянь Муалема – ван Генухтена

| Шар, м | Вологість ґрунту, $\text{м}^3/\text{м}^3$ | | Коефіцієнт фільтрації, м/добу | Коефіцієнти рівнянь Муалема – ван Генухтена | | |
|----------|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|------|-----------|
| | Найменша вологоємність, θ_r | Повна вологоємність, θ_s | | α , 1/м | n | λ |
| 0.05-0.3 | 0.0736 | 0.4462 | 0.53 | 2.56 | 1.64 | 0.27 |
| 0.4-0.7 | 0.0772 | 0.4352 | 0.35 | 2 | 1.66 | 0.3 |
| 0.8-1.5 | 0.0684 | 0.4322 | 0.93 | 11 | 1.6 | 0.41 |

Таблиця 2.12 Коефіцієнти рівняння Брукса і Корі

| Шар, м | Вологість ґрунту, $\text{м}^3/\text{м}^3$ | | Коефіцієнт фільтрації, м/добу | Коефіцієнти рівняння Брукса і Корі | |
|----------|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------|
| | Найменша вологоємність, θ_r | Повна вологоємність, θ_s | | α , 1/м | λ |
| 0.05-0.3 | 0.0736 | 0.4462 | 0.53 | 7.8 | 0.34 |
| 0.4-0.7 | 0.0772 | 0.4352 | 0.35 | 6.1 | 0.35 |
| 0.8-1.5 | 0.0684 | 0.4322 | 0.93 | 35 | 0.35 |

Таблиця 2.13 – Коефіцієнти рівнянь Уінстона та Авер'янова

| Шар, м | Вологість ґрунту, $\text{м}^3/\text{м}^3$ | | Коефіцієнт фільтрації, м/добу | Коефіцієнти рівнянь | |
|----------|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------|
| | Найменша вологоємність, θ_r | Повна вологоємність, θ_s | | Уінстона, m | Авер'янова, m |
| 0.05-0.3 | 0.0736 | 0.4462 | 0.53 | 4.4 | 13 |
| 0.4-0.7 | 0.0772 | 0.4352 | 0.35 | 4.5 | 14.2 |
| 0.8-1.5 | 0.0684 | 0.4322 | 0.93 | 4.4 | 26.5 |

Таблиця 2.14 – Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за емпіричними формулами

| № | Формула | Середньоквадратичне відхилення | | |
|---|---------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| | | h=0.05-0.3 м | h=0.4-0.7 м | h=0.8-1.5 м |
| 1 | Брукса і Корі | 0.113 | 0.322 | 0.331 |
| 2 | ван Генухтена | 0.169 | 0.353 | 0.350 |
| 3 | Авер'янова | 0.499 | 0.524 | 0.913 |
| 4 | Уінстона | 2.394 | 2.084 | 4.809 |

$$k = NN(W), \quad (2.23)$$

де W - значення вологості ґрунту,

NN - перетворення нейронної мережі.

Дослідимо вплив виду функції активації прихованого шару нейромережі на точність її роботи. Побудуємо двошарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – 1, кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Левенберга-Марквардта ('trainlm'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Результати дослідження наведено у таблиці 2.15 та рис. 2.29. Як видно з таблиці 2.15, найкращу точність роботи нейромережі отримуємо при сигмоїдній (логістичній) та тангенціальній функціях активації нейрону прихованого шару. Незначно відрізняється за точністю мережа з радіально-базисною функцією активації нейрону у прихованому шарі.

Дослідимо вплив кількості нейронів прихованого шару нейромережі на точність її роботи. Побудуємо двошарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – змінна величина, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Левенберга-Марквардта ('trainlm'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse').

Таблиця 2.15 – Вплив виду функції активації прихованого шару нейромережі на точність її роботи

| № | Функція активації нейронів прихованого шару нейромережі | Формула | Область значень | Запис функції | СКВ на тестувальній вибірці даних |
|---|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|---------------|-----------------------------------|
| 1 | Сигмоїдна логістична функція | $f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$ | (0; 1) | logsig | 0.0730 |
| 2 | Радіально-базисна (гаусова) | $f(s) = e^{-s^2}$ | (0; 1) | radbas | 0.0735 |
| 3 | Гіперболічний тангенс (сигмоїдна) | $f(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$ | (-1; 1) | tansig | 0.0730 |
| 4 | Лінійна | $f(s) = s$ | $(-\infty; +\infty)$ | purelin | 0.0816 |

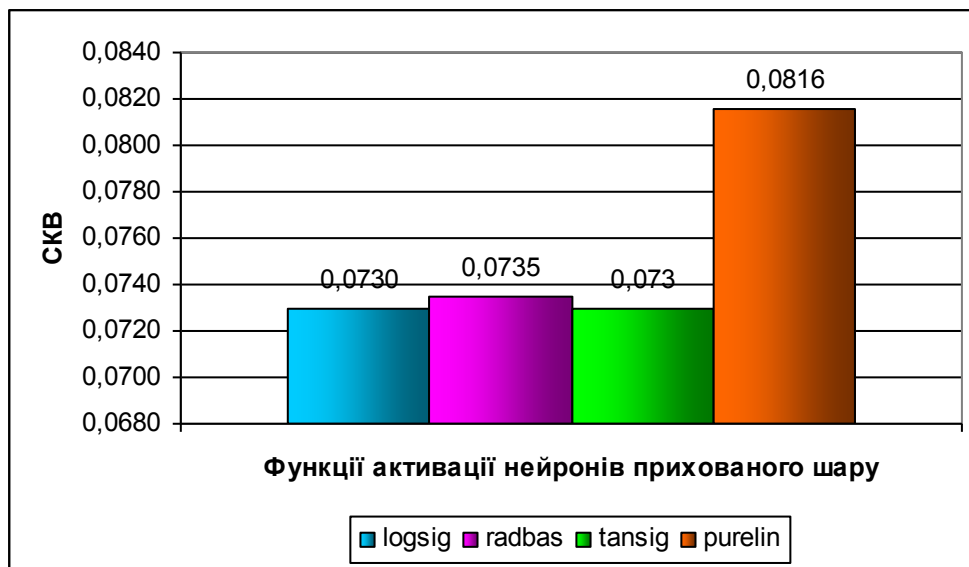


Рисунок 2.29 – Залежність точності роботи двошарової нейромережі $k = NN(W)$ архітектури 1-1-1 від виду функції активації нейронів прихованого шару

Змінюватимемо кількість нейронів прихованого шару від 1 до 20 і аналізуватимемо точність роботи мережі на тестувальній вибірці даних. Результати дослідження наведено на рис. 2.30. Як видно з рис. 2.30, у прихованому шарі нейромережі достатньо чотирьох нейронів. При збільшенні числа нейронів точність роботи нейромережі значно не покращується, а швидкість навчання зменшується, тому нарощування кількості нейронів у прихованому шарі більше чотирьох не є доцільним.



Рисунок 2.30 – Залежність точності роботи нейромережі $k = NN(W)$ архітектури 1-n-1, Logsig-Purelin від кількості нейронів прихованого шару

Повторимо дослідження впливу функції активації нейронів прихованого шару нейромережі на точність її роботи. Побудуємо двошарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – 4, кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Левенберга-Марквардта ('trainlm'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Результати дослідження наведено у таблиці 2.16 та рис. 2.31.

Таблиця 2.16 – Вплив виду функції активації прихованого шару нейромережі на точність її роботи

| № | Функція активації нейронів прихованого шару нейромережі | Формула | Область значень | Запис функції | СКВ на тестувальній вибірці даних |
|---|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|---------------|-----------------------------------|
| 1 | Сигмоїдна логістична функція | $f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$ | (0; 1) | logsig | 0.0222 |
| 2 | Радіально-базисна (гаусова) | $f(s) = e^{-s^2}$ | (0; 1) | radbas | 0.0222 |
| 3 | Гіперболічний тангенс (сигмоїдна) | $f(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$ | (-1; 1) | tansig | 0.0218 |
| 4 | Лінійна | $f(s) = s$ | $(-\infty; +\infty)$ | purelin | 0.0816 |

Як видно з таблиці 2.16, при збільшенні кількості нейронів у прихованому шарі нейромережі з сигмоїдною, радіально-базисною та тангенціальною функціями активації покращили свою точність роботи, при цьому величина СКВ для всіх трьох мереж практично однакова. Мережа з лінійною функцією активації свою точність не покращила.

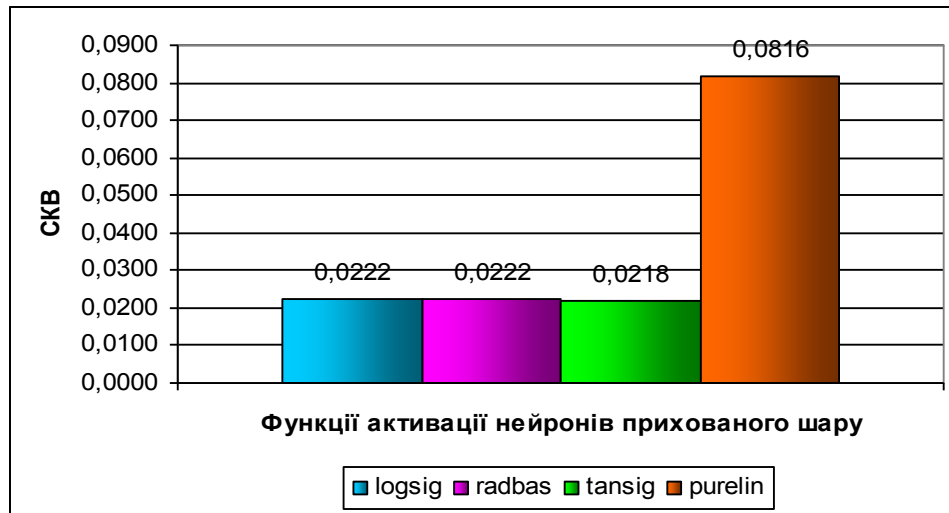


Рисунок 2.31 – Залежність точності роботи двошарової нейромережі $k = NN(W)$ архітектури 1-4-1 від виду функції активації нейронів прихованого шару

Дослідимо вплив нарощування кількості шарів нейронів на точність роботи нейромережі. Побудуємо тришарові нейромережі з наступними параметрами: кількість нейронів першого шару – 4, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – n , функції активації нейронів другого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів третього шару – 1, функція активації нейрону третього шару – лінійна ('purelin'), метод навчання – Левенберга-Марквардта ('trainlm'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Результати дослідження наведено на рис. 2.32. Як видно з рис. 2.32, введення другого прихованого шару не покращує якість роботи нейромережі.



Рисунок 2.32 – Залежність точності роботи нейромережі $k = NN(W)$ архітектури 1-4-n-1, Logsig-Logsig-Purelin від кількості нейронів другого прихованого шару

Тому для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту доцільно використовувати двошарові нейромережі. Результати тестування нейромережі $k = NN(W)$ архітектури 1-4-1, Logsig-Purelin для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту наведено на рис. 2.33. Значення СКВ при навчанні і тестуванні нейромереж наведено у таблиці 2.17.

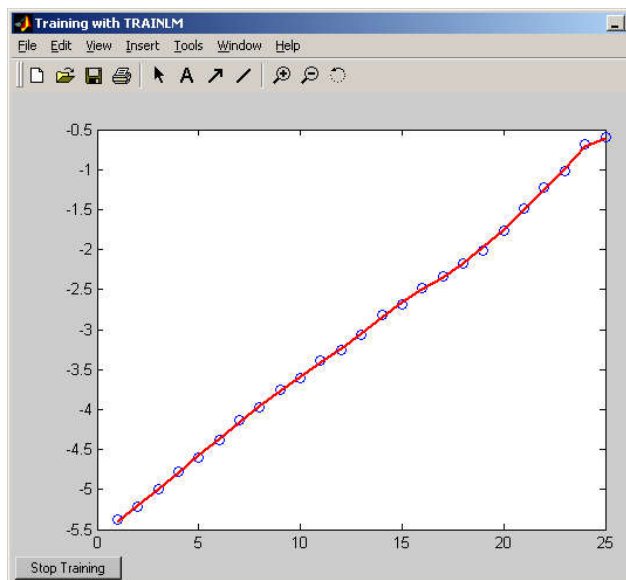
Таблиця 2.17 – Результати роботи нейромереж $k = NN(W)$ архітектури 1-4-1 Logsig-Purelin для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту

| Шар ґрунту | Кількість точок | | СКВ відхилення, м/добу | |
|--------------|-----------------|------------|------------------------|------------|
| | навчання | тестування | навчання | тестування |
| h=0.05-0.3 м | 25 | 25 | 0.0151 | 0.0222 |
| h=0.4-0.7 м | 24 | 25 | 0.0333 | 0.0454 |
| h=0.8-1.5 м | 17 | 25 | 0.0608 | 0.0788 |

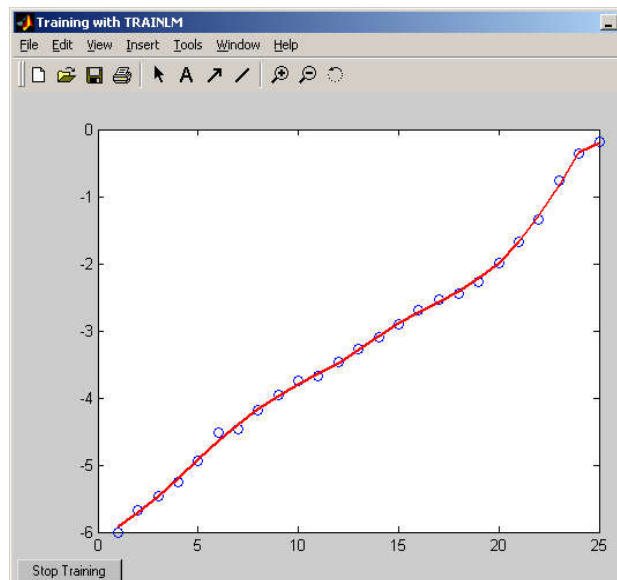
Розробимо нейромодель для розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту k як функцію від всмоктуючого тиску ґрунту виду:

$$k = NN(\psi), \quad (2.24)$$

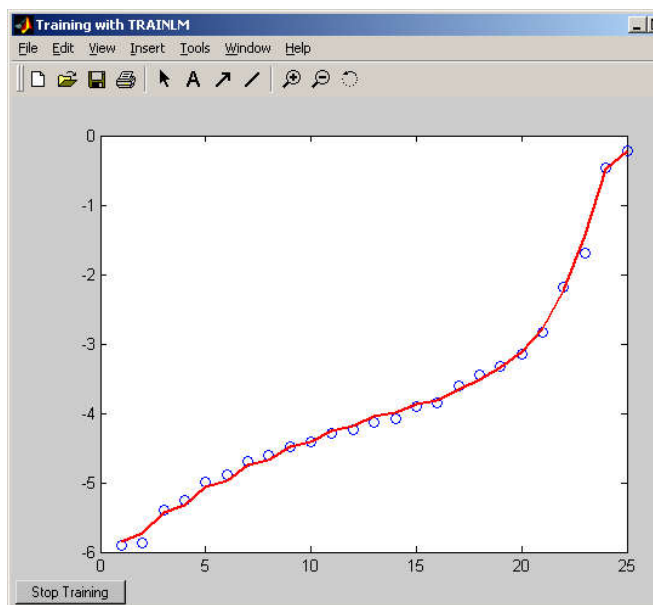
де ψ - значення всмоктуючого тиску ґрунту,



а)



б)



в)

Рисунок 2.33 – Результати тестування неймережі $k = NN(W)$ архітектури 1-4-1, Logsig-Purelin для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту у різних шарах: а – $h=0.05-0.3$ м, б – $h=0.4-0.7$ м, в – $h=0.8-1.5$ м: - тестувальна вибірка даних, ————— – результати роботи неймережі

NN - перетворення нейронної мережі.

Результати тестування нейромережі $k = NN(\psi)$ архітектури 1-4-1, Logsig-Purelin для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту наведено на рис. 2.34. Значення СКВ при навчанні і тестуванні нейромереж наведено у таблиці 2.18.

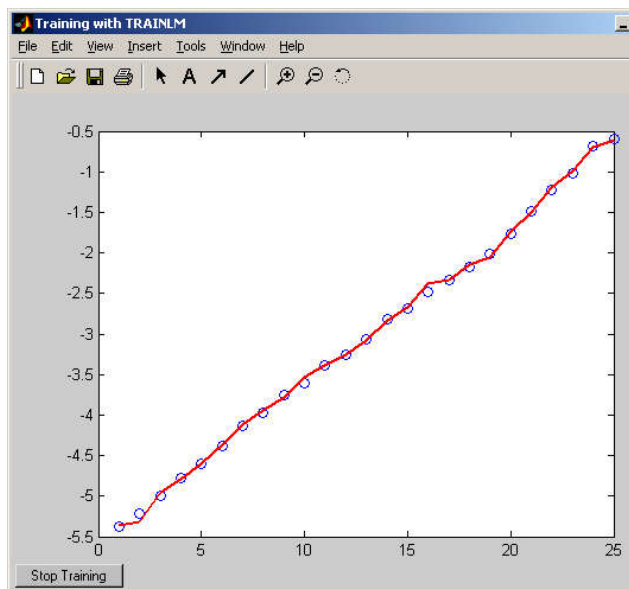
Таблиця 2.18 – Результати роботи нейромереж $k = NN(\psi)$ архітектури 1-4-1, Logsig-Purelin для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту

| Шар ґрунту | Кількість точок | | СКВ, м/добу | |
|--------------|-----------------|------------|-------------|------------|
| | навчання | тестування | навчання | тестування |
| h=0.05-0.3 м | 25 | 25 | 0.0213 | 0.0386 |
| h=0.4-0.7 м | 24 | 25 | 0.0570 | 0.0737 |
| h=0.8-1.5 м | 16 | 15 | 0.0806 | 0.1148 |

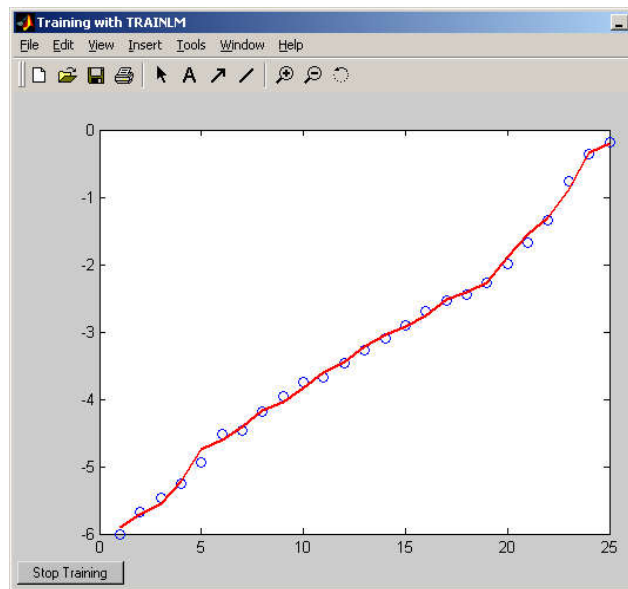
Таким чином, коефіцієнт вологопровідності, який описує фізичні процеси у ґрунті, можна визначити за допомогою ряду емпіричних формул, в які входять експериментальні коефіцієнти. Альтернативним методом є використання нейронних мереж, за допомогою яких на основі експериментальної вибірки з достатньо високою точністю ідентифікується коефіцієнт вологопровідності або будь-який інший параметр ґрунту, що є функцією від експериментальних даних. Навчену НМ на навчальній вибірці даних можна успішно використовувати на тестових незалежних вибірках для певного типу ґрунту, які не входили у навчальний набір.

2.5.2 Розрахунок вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту

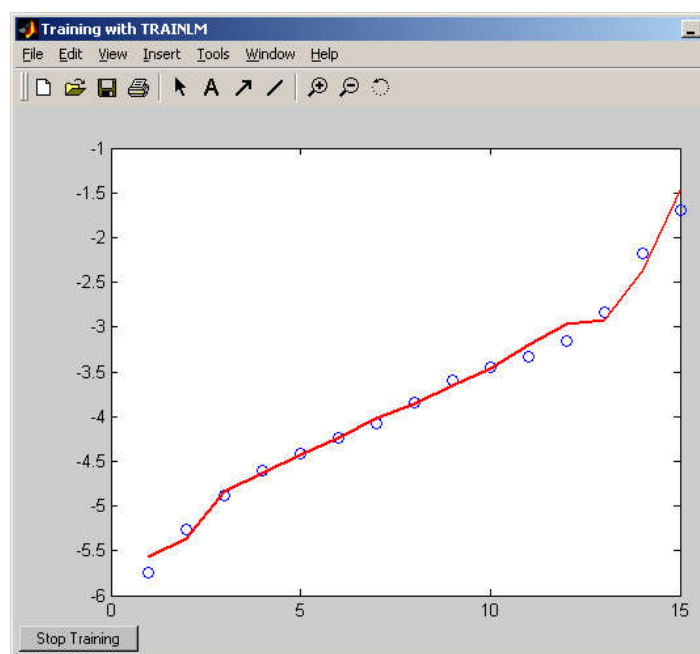
Сила, з якою волога утримується у ґрунті, називається потенціалом ґрунтової вологи. Потенціал визначається як робота, яку треба здійснити зовнішнім силам з одиницею кількості води у рівноважній, ізотермічній системі «ґрунт-вода» (або «рослина-вода») для її переміщення до резервуару води у стандартному стані – чиста незв'язана вода [76]. Повний потенціал складається з компонентів:



а)



б)



в)

Рисунок 2.34 – Результати тестування неймережі $k = NN(\psi)$ архітектури 1-4-1, Logsig-Purelin для визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту у різних шарах: а – $h=0.05-0.3$ м, б – $h=0.4-0.7$ м, в – $h=0.8-1.5$ м: - тестувальна вибірка даних, ———— – результати роботи неймережі

$$\psi_w = \psi_p + \psi_g + \psi_m + \psi_s, \quad (2.25)$$

де ψ_p - потенціал тиску, вище РГВ рівний нулю;

ψ_g - гравітаційний потенціал, різниця висот між поточною точкою і точкою відліку;

ψ_s - осмотичний потенціал, функція концентрації та іонного складу ґрунтового розчину;

ψ_m - капілярно-сорбційний потенціал, векторна сума капілярних і сорбційних сил твердої фази ґрунту та її скелету.

Рух вологи у насичених і ненасичених ґрунтах. Розрізняють рух вологи у насичених і ненасичених ґрунтах. Насичений ґрунт – це ґрунт, прорізний простір якого повністю зайнято водою. Математичний опис руху вологи у насичених ґрунтах базується на законі Дарсі:

$$q = -k_0 \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (2.26)$$

де q - об'єм води, що протікає за одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу ґрунту на глибині z , м/добу;

Φ - повний потенціал ґрунтової вологи, м вод. ст.;

k_0 - гідравлічна провідність насиченого ґрунту або коефіцієнт фільтрації, м/добу.

У насичених ґрунтах величина коефіцієнта фільтрації постійний доти, поки структура ґрунту залишається стабільною.

Специфічною ознакою зони аерації є неповна водонасиченість, тісно пов'язана із виявом капілярних сил. Розглянемо рух вологи у ненасичених ґрунтах. Відмічено дві важливі відмінності між насиченим і ненасиченим вологопереносом у ґрунті:

1. Рушійна сила, що виникає за рахунок градієнту гідравлічного тиску, замінюється силою натягу, обумовленого в основному градієнтом капілярно-сорбційного потенціалу ($grad\psi_m \approx \frac{\Delta\psi}{\Delta z}$).

2. Поперечний перетин, через який тече вода, зменшується, коли пори лише частково заповнені водою. Внаслідок цього гідравлічна провідність ненасичених вологою ґрунтів (капілярна провідність k , см/добу) характеризується не єдиним значенням (як при насиченому вологопереносі), а обов'язково функцією від всмоктуючого тиску $k = k(\psi_m)$ або від вологості ґрунту $k = k(\theta)$. Очевидно, що капілярна провідність завжди менша коефіцієнта фільтрації ($k < k_0$). Об'єм пор, що зайняті водою, при певному тиску характеризуються кривими водо утримуючої здатності (pF-кривими). При цьому збільшення всмоктуючого тиску відповідає зменшенню вологості θ , відповідно і об'єму пор, зайнятих вологою, а також капілярної провідності.

Таким чином, якщо припустити, що гідравлічна провідність ґрунту є функцією об'ємного вмісту води у ґрунті $k = k(\theta)$, то рух води у ненасичених ґрунтах також відбувається згідно закону Дарсі [76]:

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (2.27)$$

де $\Phi = -\psi_m + \psi_g$, при умові, що вісь z направлена вниз.

Нелінійне одномірне рівняння нестационарного вологопереносу в ґрунтах. Виведемо одномірне рівняння нестационарного вологопереносу в ґрунтах. Використовуючи рівняння Дарсі для потоку води у ненасиченому ґрунті (2.27) та рівняння нерозривності для нестискуваної рідини у нестискуваному пористому середовищі, яке виражає собою закон збереження води в елементарному об'ємі ґрунту:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial q}{\partial z} - I_\theta, \quad (2.28)$$

отримаємо диференціальне рівняння в частинних похідних відносно невідомої функції вологості $\theta(z, \tau)$, яке описує ненасичений водний потік у ґрунтовому профілі:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[-k(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] - I_{\theta}, \quad (2.29)$$

де θ - об'ємна вологість ґрунту, м³/м³;

I_{θ} - об'єм води, який видаляється з одиниці об'єму ґрунту за одиницю часу (в основному це споживання води рослинами та фізичне випаровування).

Система основних рівнянь процесів вологопереносу в ґрунтах. Використовуючи те, що при певному виборі одиниць вимірювання гравітаційна складова повного потенціалу Φ рівні висоті z , тобто $\Phi = z - \psi_m$, одержимо рівняння для гомогенного середовища (рівняння Річардса):
відносно вологості

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} - k(\theta) \right] - I_{\theta}, \quad (2.30)$$

відносно всмоктуючого тиску ґрунту

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(W) \frac{\partial \psi(W)}{\partial z} - k(W) \right] - I_W \quad (2.31)$$

відома як основне рівняння руху ґрунтової води [22; 103].

Дане рівняння може бути використано також для опису руху води у негомогенному середовищі, тобто коли $k = k(z, \theta)$, $\psi = \psi(z, \theta)$. Очевидно, що рівняння (2.30 і 2.31) не замкнуті і повинні доповнюватися співвідношеннями, що виражають залежності:

$$k = k(\theta), \quad \psi = \psi(\theta), \quad (2.32)$$

індивідуальні для різних типів ґрунтів. Коли профіль ґрунту складається з кількох різних типів ґрунтів, маємо залежність:

$$k = k(z, \theta), \quad \psi = \psi(z, \theta), \quad (2.33)$$

характерну для негетерогенного середовища.

Таким чином, система рівнянь (2.29-2.33) забезпечує розв'язок задачі відносно вологості ґрунту. При цьому є можливість одержувати також епюри всмоктуючого тиску.

Крайові умови. Відносно рівняння вологопереносу крайові умови – граничні та початкові умови – можна сформулювати таким чином. Граничні умови на поверхні являють собою результуючий потік, що дорівнює сумі потоків:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -g(z, \tau)|_{z=0} = p - g_B - g_{IH} - g_K, \quad (2.34)$$

де p - потік від випадання дощу чи поливу;

g_B - інтенсивність фізичного випаровування;

g_{IH} - інтенсивність інфільтрації в ґрунт;

g_K - потік, що йде на споживання коренями рослин, які знаходяться у верхньому горизонті ґрунту.

Оскільки в якості нижньої границі взято РГВ, то гранична умова там запишеться:

$$\theta(z, \tau)|_{z=H} = \theta_{max} = const, \quad \psi(z, \tau)|_{z=H} = 0 \quad (2.35)$$

де θ_{max} або θ_H - вологість повного насичення.

В якості початкової умови прийнято розподіл вологості у початковий момент часу:

$$z > 0, \quad \theta(z, \tau)|_{\tau=0} = \theta_0(z), \quad (2.36)$$

де $\theta_0(z)$ - відома функція або експериментально одержаний розподіл вологості по осі oz .

Розв'язати рівняння (2.30 і 2.31) у точному аналітичному вигляді при граничних умовах (2.34) та (2.35) і початкових умовах (2.36), тобто знайти розподіл вологості $\theta(z, \tau)$ як функцію глибини z і часу τ неможливо. Тому знаходять наближений розв'язок таких рівнянь переходом від неперервної моделі вологопереносу до дискретної. Опис дискретної математичної моделі вологопереносу в ґрунтах наведено у додатку Е.

Для розрахунку рівняння вертикального вологопереносу використана розроблена у Вагенінгенському університеті (Голландія) програма SWAP, яка імітує транспортування води, розчинених речовин і тепла в зоні аерації у взаємодії з розвитком рослинності. У вертикальному напрямку модель сягає від поверхні ґрунту до площини мілководних ґрунтових вод. У цій зоні процеси переносу переважно вертикальні, тому SWAP є одномірною, вертикально орієнтованою моделлю.

Рівняння вертикального вологопереносу (2.30, 2.31) (рівняння Річардса) має чітке фізичне значення і є об'єктивним законом руху рідини в ґрунті. Розв'язуючи його в чисельному вигляді, тобто, задаючи невеликі кроки в часі по вертикальній координаті (глибині) для окремих елементарних шарів, можна визначити розподіл вологості в ґрунтовому профілі, виходячи з початкових умов, надходження опадів і поливів, рослин, тощо. Через багатосторонність рівняння Річардса, воно використовується в програмі SWAP для ненасиченої і насиченої зони, з можливістю присутності перехідного процесу (флуктуацій) і впливом ґрунтових вод.

Чисельний розв'язок. Точне чисельне рішення рівняння Річардса ускладнене через його гіперболічний характер, сильну нелінійність ґрунтових гідравлічних функцій (водуотримування чи основних гідрофізичних характеристик і вологопровідності) та швидку зміну граничних умов біля поверхні ґрунту. Розрахований ґрунтовий водний потік значно залежить від структури розрахункової схеми, прикладеного часу та просторової дискретизації, процедури

задання граничних умов (Van Genuchten, 1982; Milly, 1985; Celia et al., 1990; Warrick, 1991; Zaidel and Russo, 1992). В моделі SWAP числова схема була вибрана так, щоб вирішувалось одномірне рівняння Річардса з точним масовим балансом, який швидко сходиться. Дана схема в комбінації із процедурою задання верхньої граничної умови показана для точного врахування швидкого руху вологи під час інфільтрації в осушених ґрунтах. У той же час, схема чисельно ефективна (Van Dam and Feddes, 2000). Числові методи SWAP, що використовуються для розв'язку рівняння Річардса є неявними, зворотними методами скінченних різниць з явною лінеаризацією гідравлічних провідностей, як описано Haverkamp(1977) і Belmans(1983), але з такими умовами:

- Числові методи застосовуються, як для ненасичених, так і для насичених зон, і рівняння потоків розв'язуються одночасно в обох зонах.

- Об'ємна вологість ґрунту $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ оцінюється замість використання апроксимації для $C \frac{\partial h}{\partial t}$, де C – вологоємність (m^{-1}).

- Наявні декілька способів обрахунку міжвузлової вологопровідності.

Дискретна форма рівняння Річардса розв'язується ітераційно за схемою ітерації Ньютон-Рафсона, використовуючи всмоктуючі тиски, як змінні стану. Детальніше програмне забезпечення SWAP та розв'язок рівняння вертикального вологопереносу наведено у додатку Е.

Розрахунок стаціонарних профілей ґрунту. Розглянемо приклад моделі. У якості вхідних даних використаємо такі параметри: період моделювання – 31 день, рівень ґрунтових вод – 80 см, випаровування – 5 мм/добу. Потенційні потоки евапотранспірації розраховуються зі щоденних метеорологічних вимірювань Сільськогосподарські культури відсутні. Ґрунтовий профіль складається з трьох шарів глибиною 30 см, 40 см, та 130 см відповідно. Вивід результатів проводиться щоденно. Після моделювання отримали результати зміни вологості та всмоктуючого тиску ґрунту відносно глибини ґрунтового профілю. Використавши макроси MS Excel, виведемо результати моделювання

з файлів swar.var та swar.end на графіки MS Excel (рис. 2.35, 2.36). Зменшимо рівень ґрунтових вод на 20 см до 100 см і знову запустимо моделювання. Отримаємо наступні результати, наведені на рис. 2.37, 2.38. Зменшимо рівень ґрунтових вод ще нижче, до рівня 120 см. Матимемо рис. 2.39, 2.40. Зобразимо залежність всмоктуючого тиску від рівня ґрунтових вод на рис. 2.41. Візьмемо профіль з рівнем ґрунтових вод 100 см і будемо змінювати величину випаровування. Змінимо величину випаровування з 5 мм/добу до 3 мм/добу. Отримаємо залежність на рис. 2.42. Ще більше зменшимо величину випаровування, з 3 мм/добу до 1 мм/добу, отримаємо рис. 2.43. Зобразимо залежність всмоктуючого тиску від глибини ґрунтового профілю при різних значеннях випаровування (рис. 2.44).

Моделювання динамічних процесів. Для моделювання зміни всмоктуючого тиску ґрунту під впливом змінних збурюючих факторів, якими виступають погодні умови, використаємо дослідні дані Рівненської дослідної сільськогосподарської станції для ґрунтів суглинистого та супіщаного механічного складу терміном в один місяць вегетаційного періоду. Розрахунки проведемо для трьох шарів ґрунту: 0-10, 10-20 та 30-40 см. Використавши програму SWAP, отримаємо графічні залежності (рис. 2.45). Як видно з графіків рис. 2.45, програмне забезпечення SWAP дає хороші результати розрахунків при незначних змінах шуканого параметра в часі, при різких динамічних змінах точність розрахунків погіршується. У таблиці 2.19 наведено СКВ при розрахунках зміни всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту в часі, яке складає від 1.01 до 1.77 м вод. ст.

Таблиця 2.19 – Результати моделювання зміни всмоктуючого тиску ґрунту за допомогою програмного забезпечення SWAP

| № | Шар ґрунту | К-сть точок | СКВ, м вод. ст. |
|---|------------|-------------|-----------------|
| 1 | h=0-10 см | 38 | 1.77 |
| 2 | h=10-20 см | | 1.68 |
| 3 | h=30-40 см | | 1.01 |

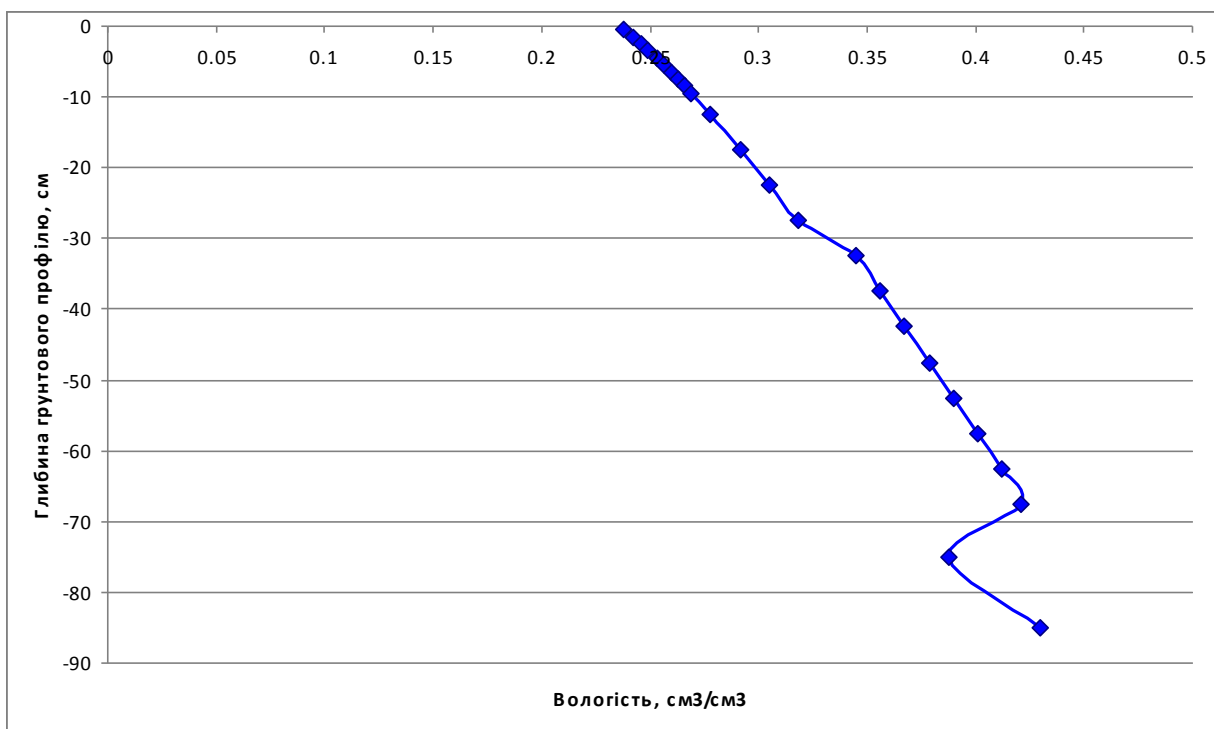


Рисунок 2.35 – Зміна вологості ґрунту по глибині ґрунтового профілю

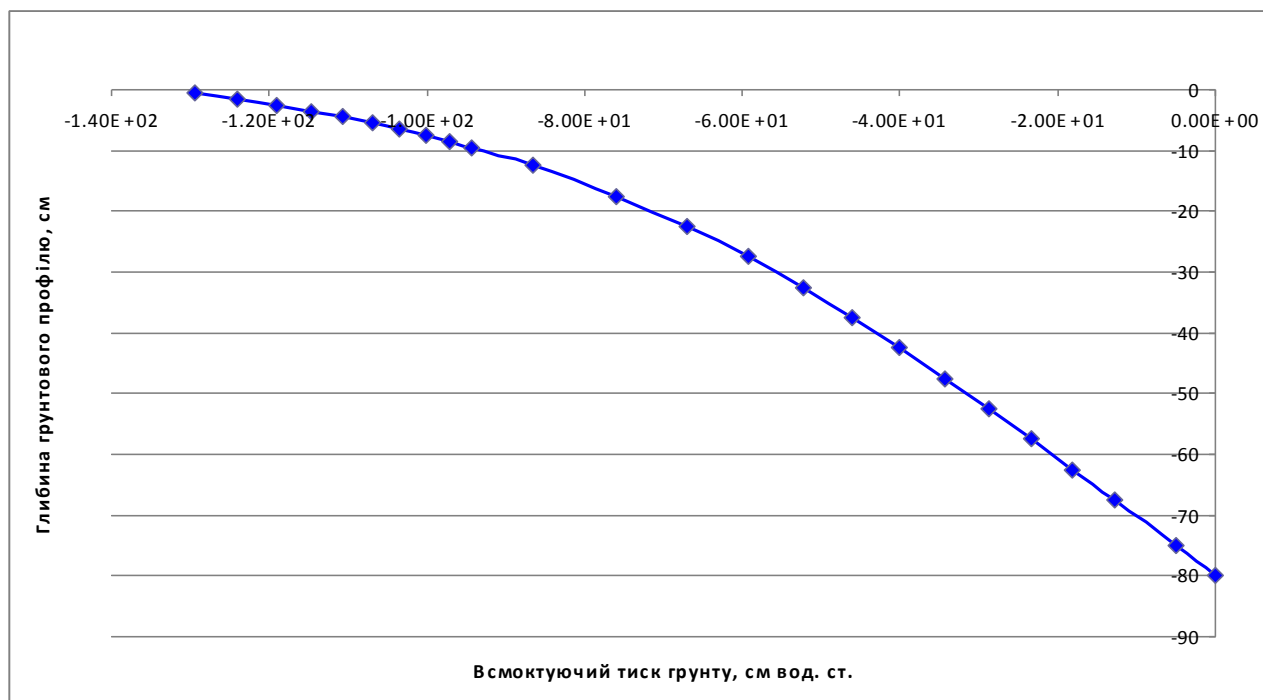


Рисунок 2.36 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю

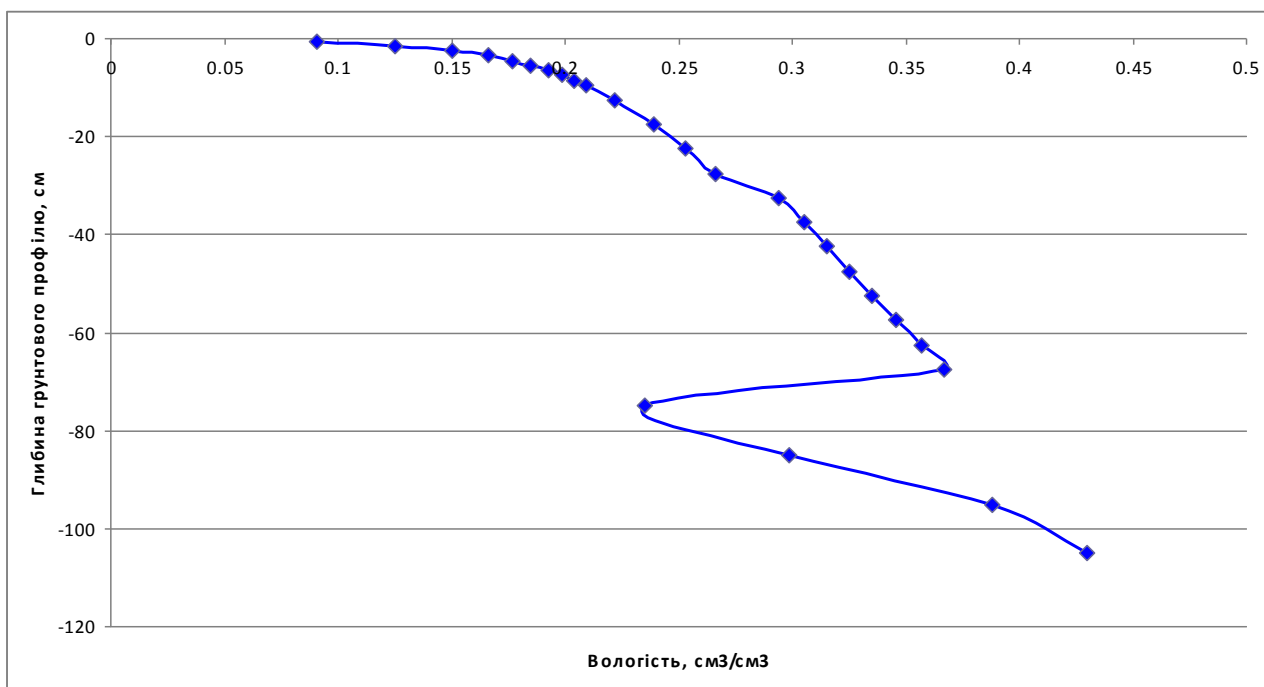


Рисунок 2.37 – Зміна вологості ґрунту по глибині ґрунтового профілю

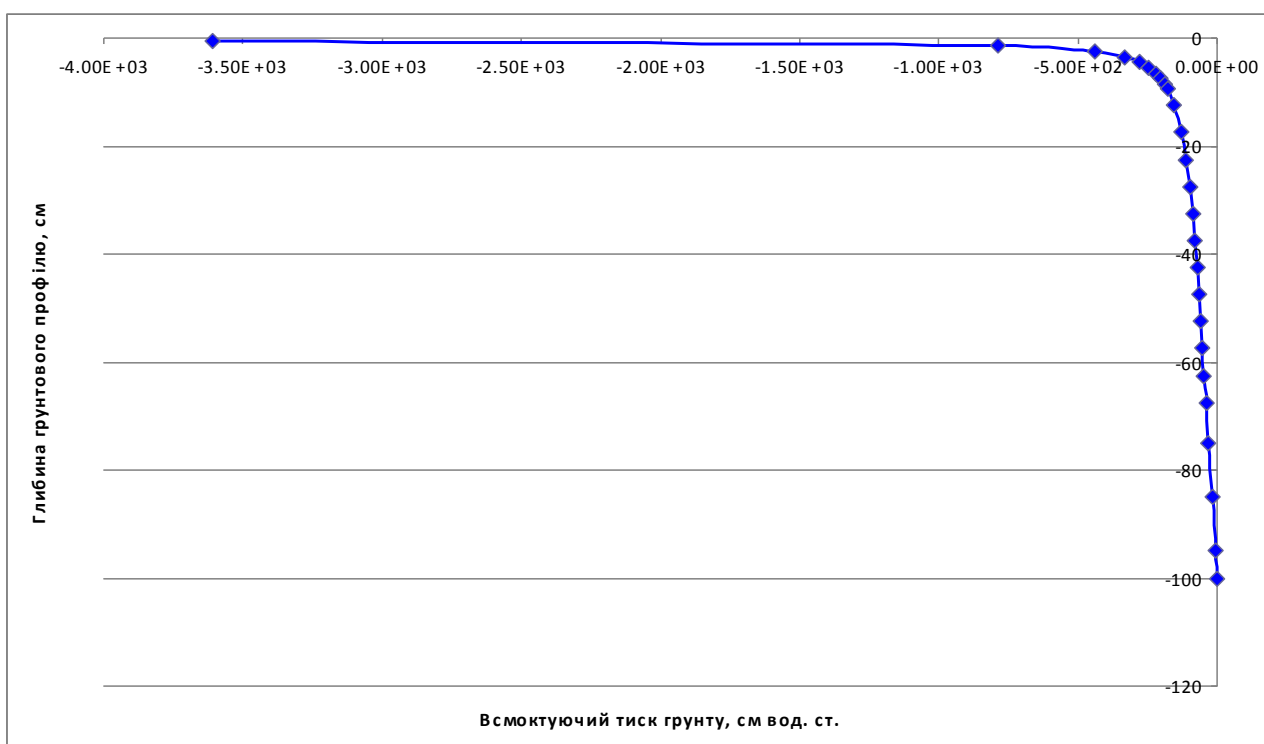


Рисунок 2.38 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю

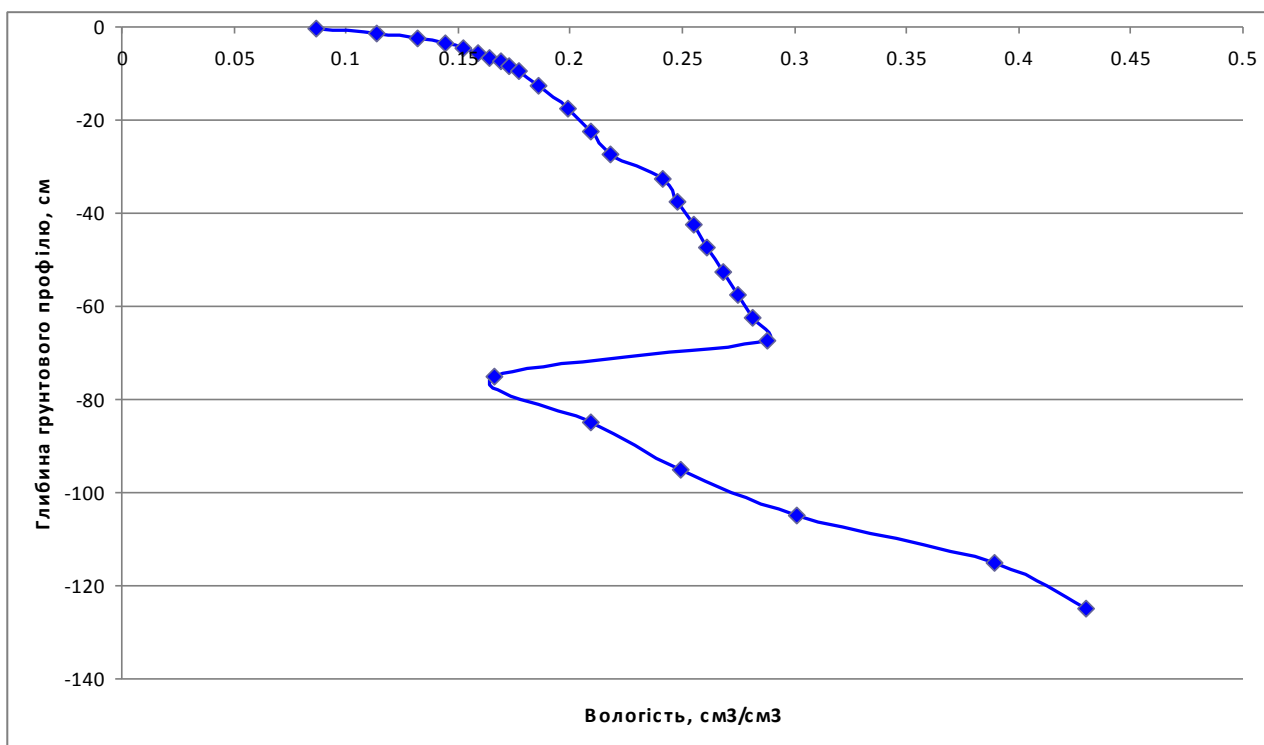


Рисунок 2.39 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю

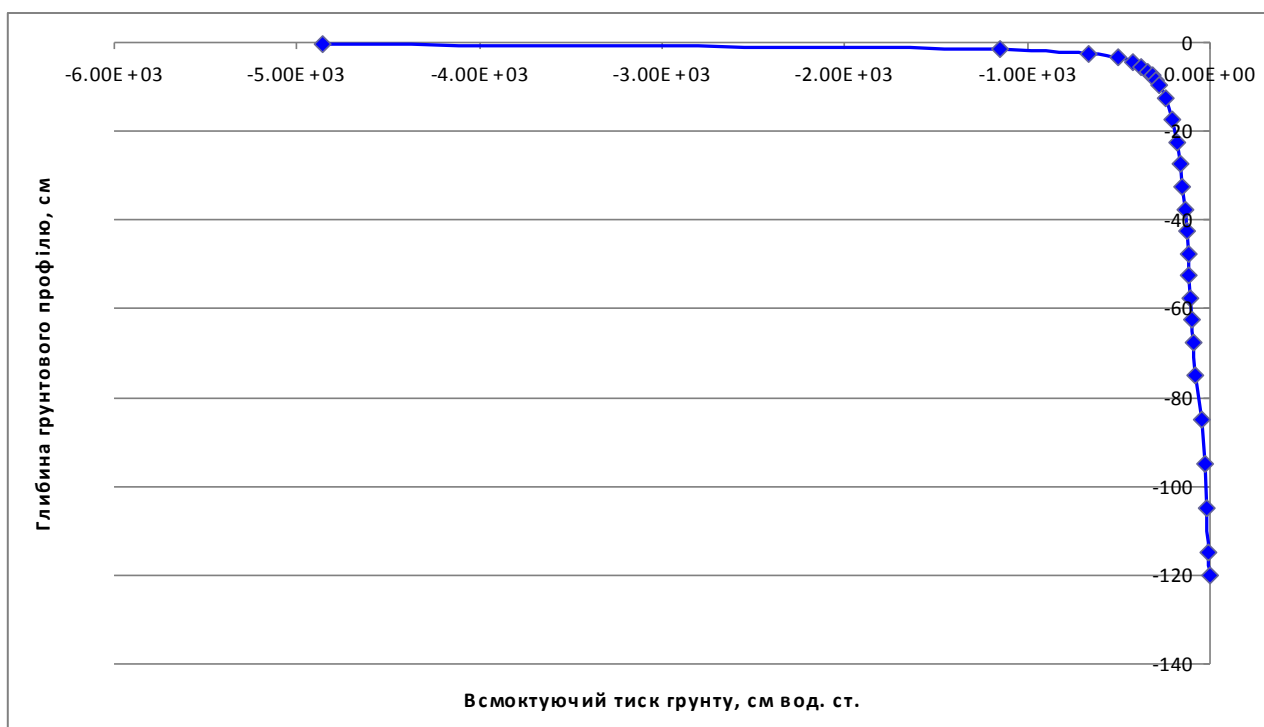


Рисунок 2.40 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю

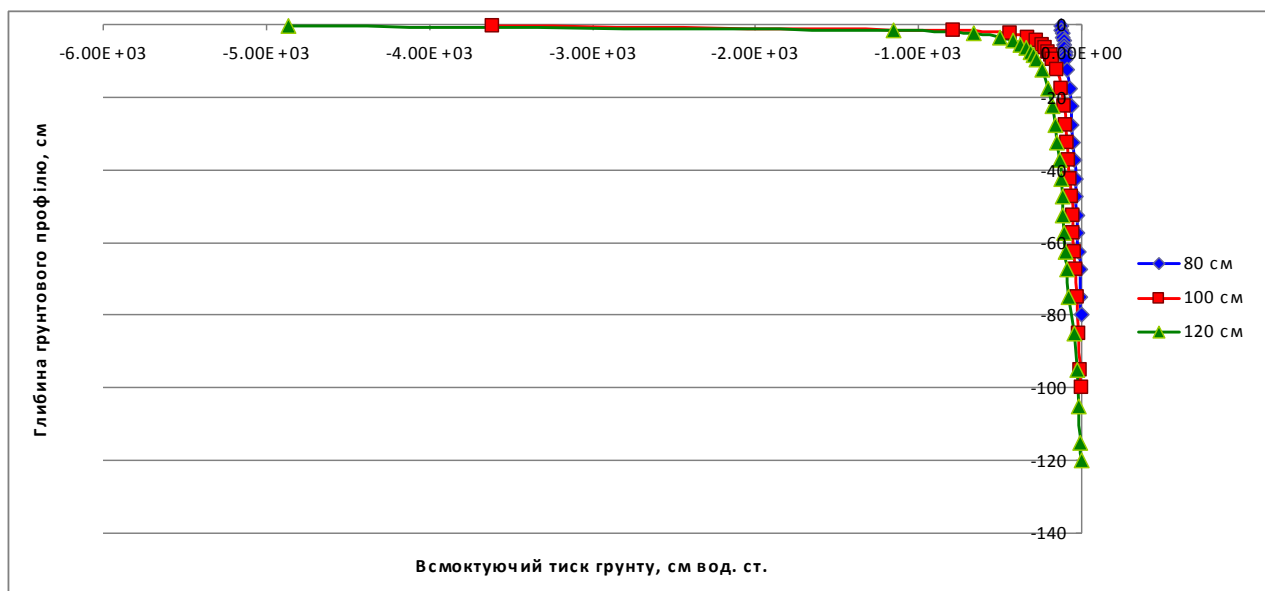


Рисунок 2.41 – Залежності всмоктуючого тиску від глибини ґрунтового профілю при різних значеннях рівня ґрунтових вод

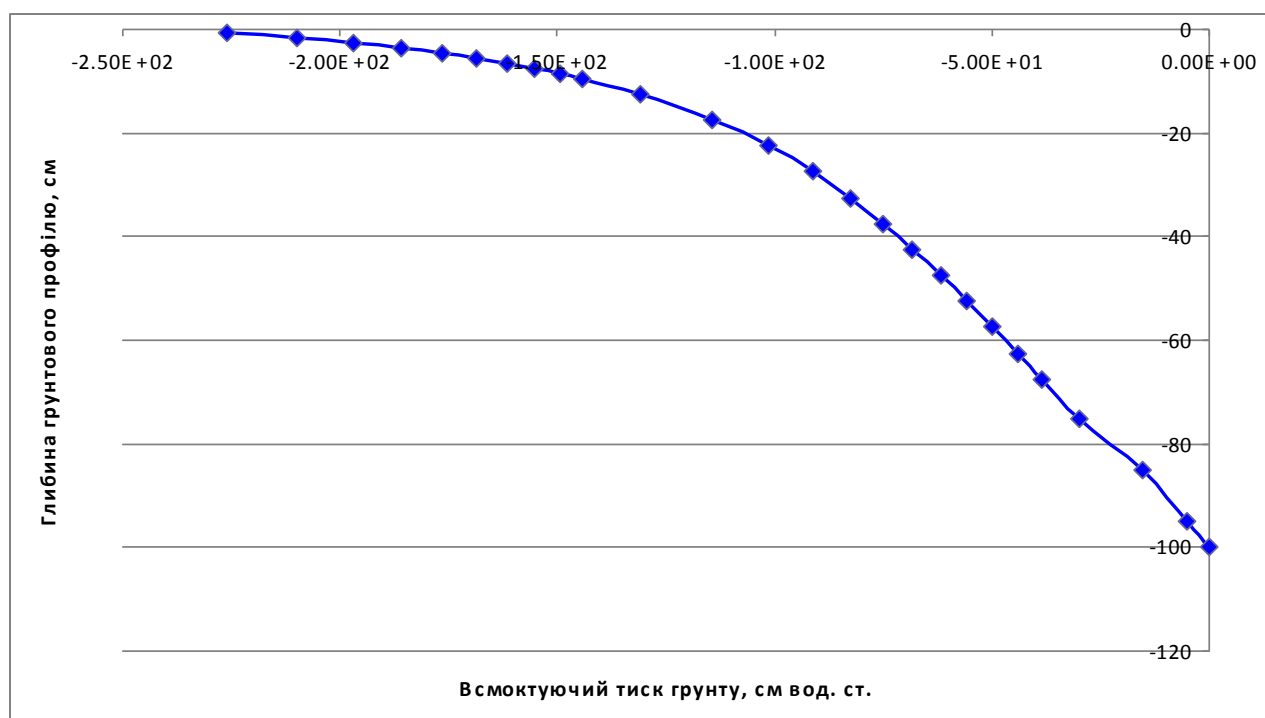


Рисунок 2.42 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю

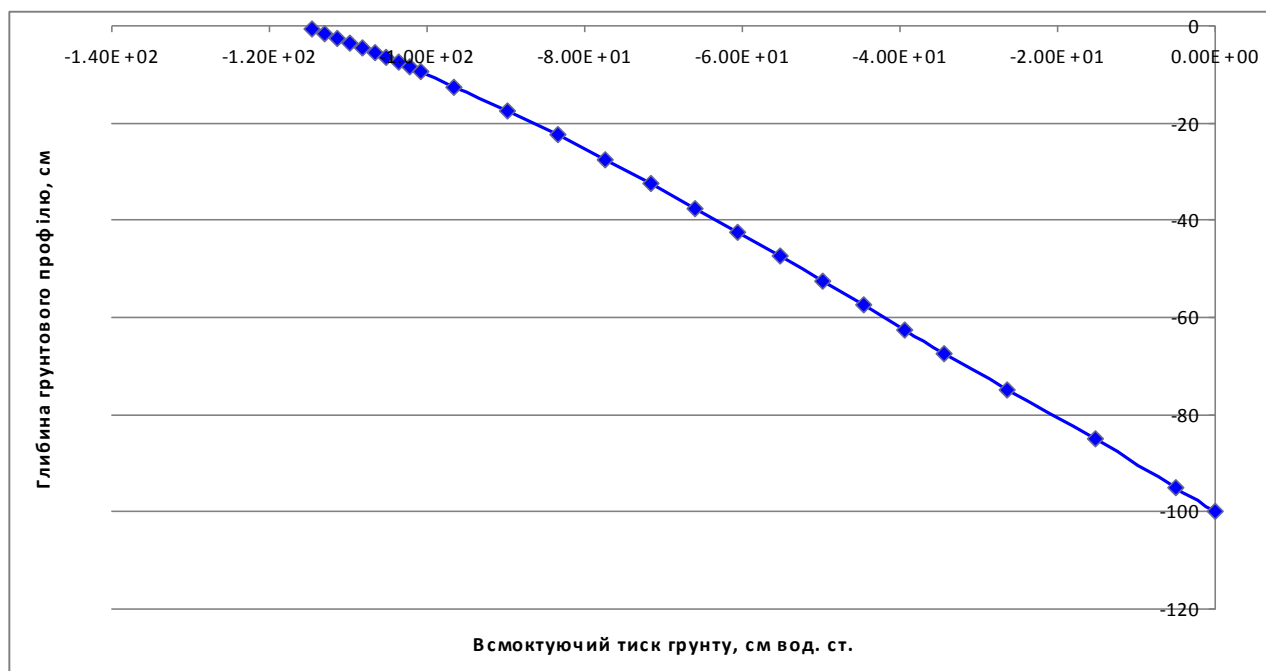


Рисунок 2.43 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту по глибині ґрунтового профілю

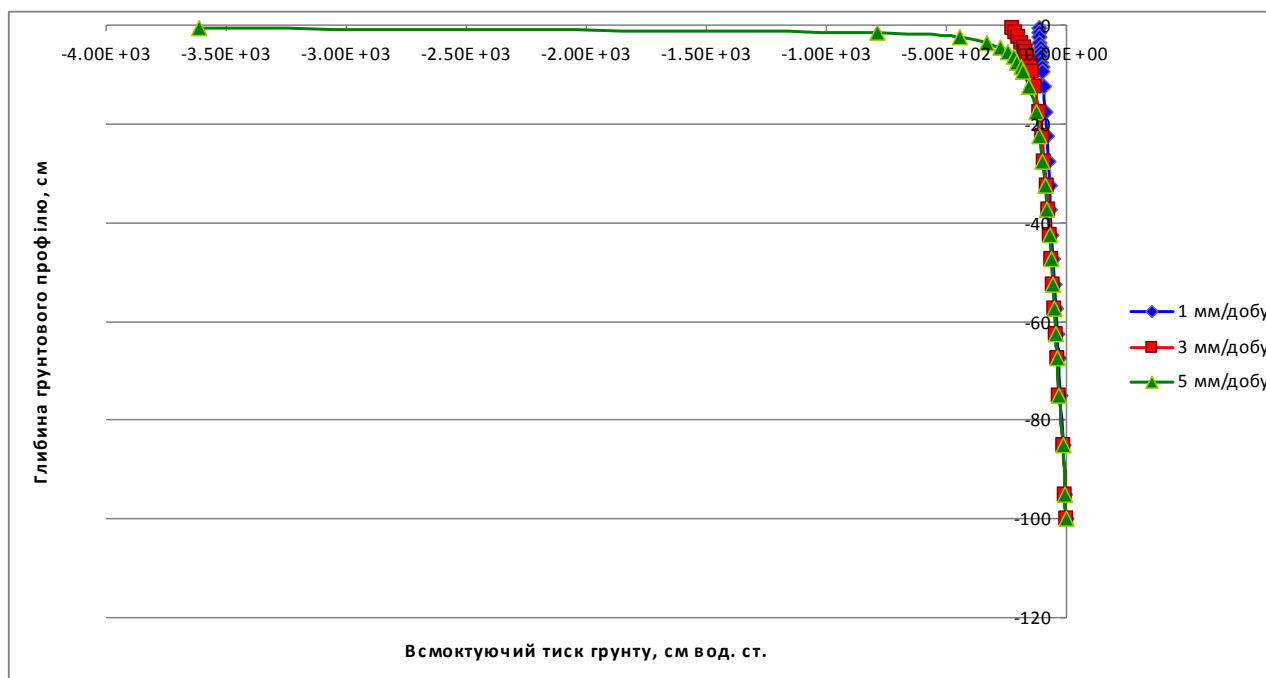


Рисунок 2.44 – Залежності всмоктуючого тиску від глибини ґрунтового профілю при різних значеннях випаровування

2.6 Порівняльний аналіз результатів моделювання вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту

Результати роботи нейромоделей різних архітектур для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту наведені у таблицях 2.20-2.22.

Таблиця 2.20 – Результати роботи нейромоделей архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту

| Шар ґрунту | Кількість точок | СКВ, м вод. ст. | |
|------------|-----------------|-----------------|------------|
| | | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 173 | 1.4383 | 1.2074 |
| h=10-20 см | | 2.0571 | 1.6472 |
| h=30-40 см | | 1.2102 | 0.8521 |

Таблиця 2.21 – Результати роботи нео-фаззі моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту

| Шар ґрунту | Кількість точок | СКВ, м вод. ст. | |
|------------|-----------------|-----------------|------------|
| | | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 173 | 0.8268 | 1.036 |
| h=10-20 см | | 0.625 | 0.6956 |
| h=30-40 см | | 0.3093 | 0.2819 |

Таблиця 2.22 – Результати моделювання зміни всмоктуючого тиску ґрунту методом Ньютона-Рафсона

| № | Шар ґрунту | Кількість точок | СКВ, м вод. ст. |
|---|------------|-----------------|-----------------|
| 1 | h=0-10 см | 38 | 1.77 |
| 2 | h=10-20 см | | 1.68 |
| 3 | h=30-40 см | | 1.01 |

Як видно з наведених результатів, найкращі результати моделювання вологопереносу у ненасиченій зоні ґрунту забезпечує модель на базі нео-фаззі нейронних мереж. Вони простіші за архітектурою за двошарові мережі прямого поширення з сигмоїдними функціями передачі у прихованому шарі, швидші у навчанні та простіші у технічній реалізації.

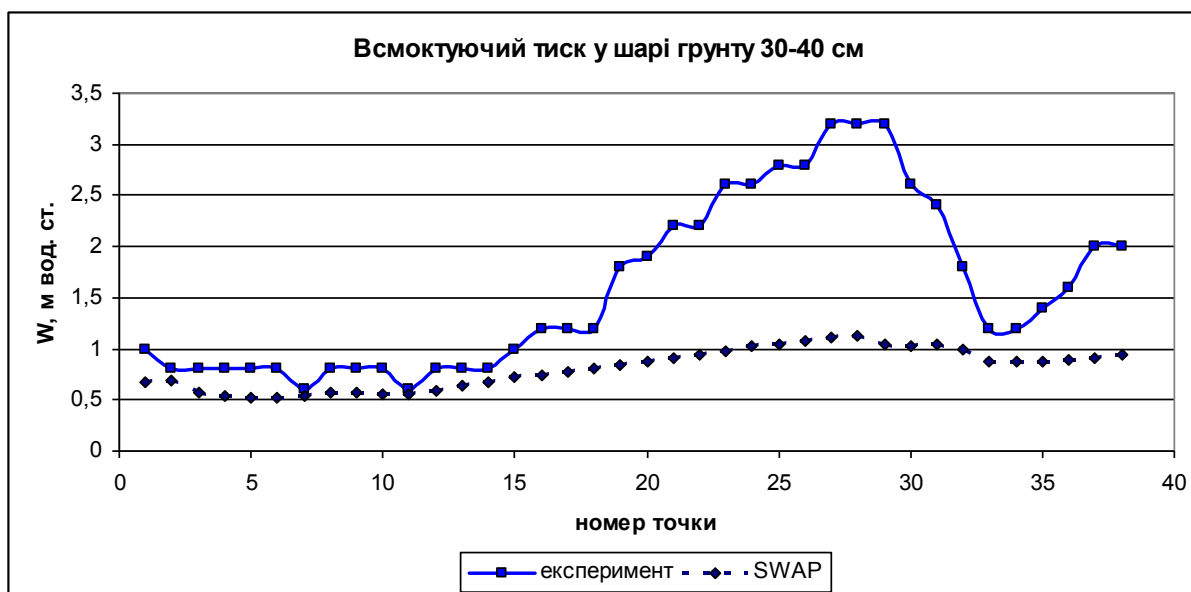
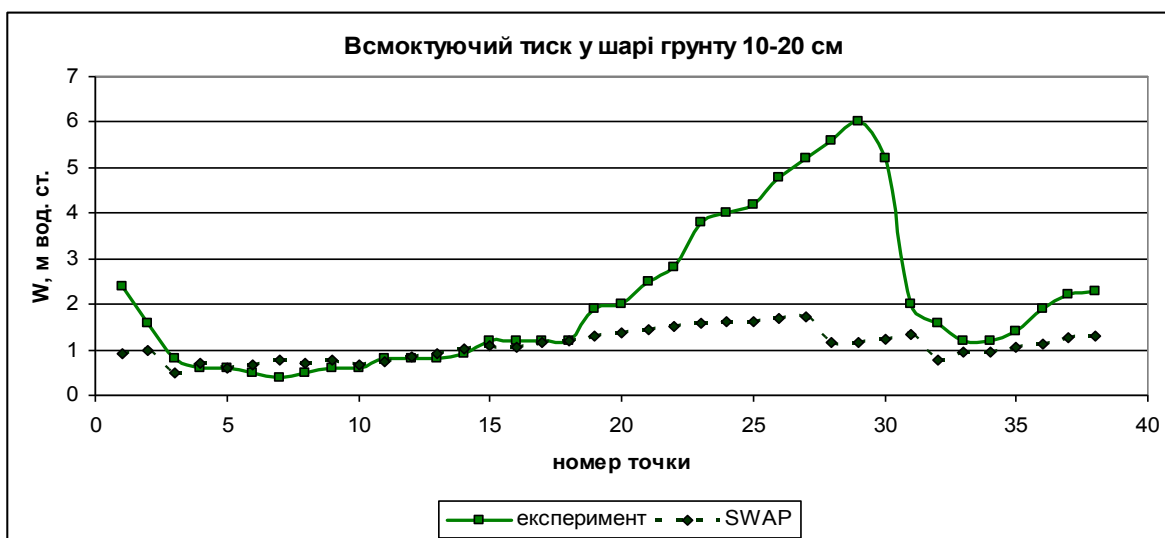
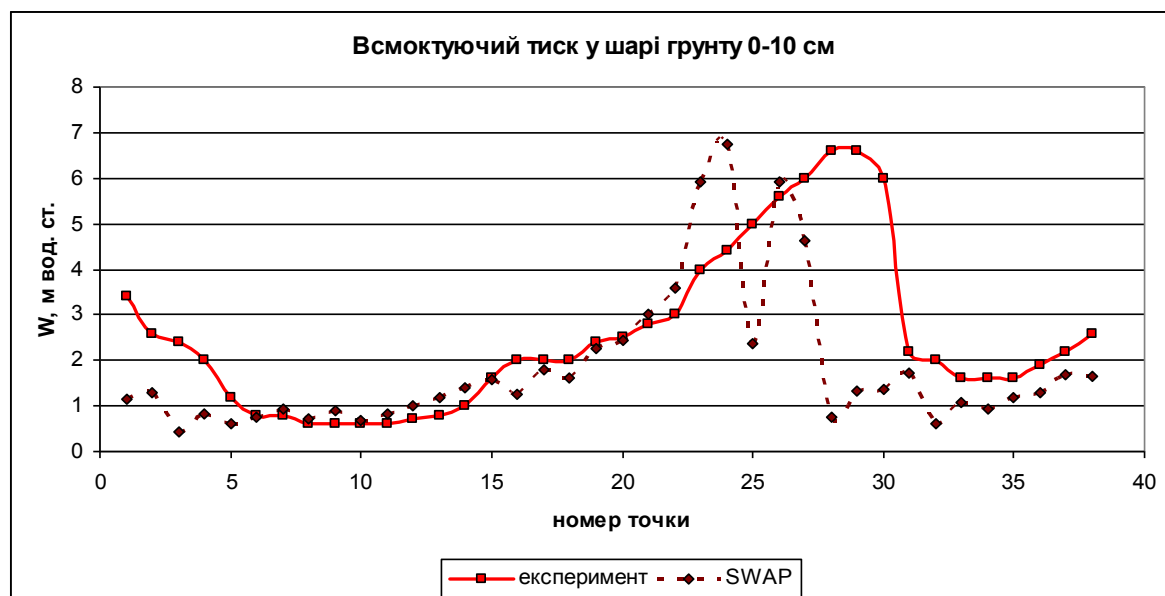


Рисунок 2.45 – Зміна всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту: $h=0-10$ см, $h=10-20$ см, $h=30-40$ см

Моделювання вологопереносу методом Ньютона-Рафсона забезпечує хорошу точність моделювання лише при незначних коливаннях всмоктуючого тиску, у режимах різких динамічних процесів точність погіршується і визначається лише деяке усереднене значення.

2.7 Розробка математичної моделі колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту

Математична модель керуючого колодязя. Розглянемо технологічну схему керуючого колодязя (рис. 2.46).

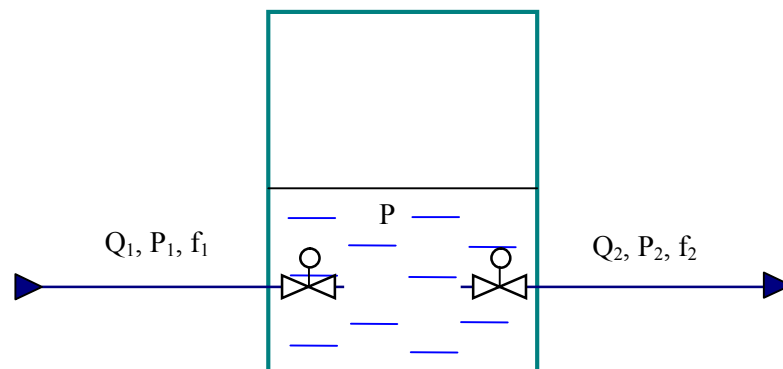


Рисунок 2.46 – Технологічна схема керуючого колодязя

Припустимо, що в колодязі відбувається ідеальне перемішування рідини. Запишемо рівняння статичної та динамічної рівноваги.

Рівняння статичної рівноваги:

$$Q_1 = Q_2, \quad (2.36)$$

Рівняння динамічної рівноваги в приростах:

$$\frac{d\Delta V}{dt} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2, \quad (2.37)$$

де $V = S \cdot H$ - об'єм рідини.

При $S = const$

$$\frac{d\Delta V}{dt} = S \cdot \frac{d\Delta H}{dt}. \quad (2.38)$$

Витрату Q_2 визначимо за рівнянням Бернуллі:

$$Q_2 = c_2 f_2 \cdot \sqrt{2 \frac{P - P_2}{\rho}},$$

або при $P_2 = 0$ і $P = \rho g H$:

$$Q_2 = c_2 f_2 \cdot \sqrt{2 g H},$$

відповідно

$$\Delta Q_2 = c_2 f_2 \cdot \sqrt{\frac{g}{2 H_0}} \cdot \Delta H \quad (2.39)$$

Індексом „0” помічені значення змінних, в околі яких здійснюється лінеаризація нелінійних характеристик.

Підставимо (2.38) і (2.39) в (2.37), отримаємо:

$$S \frac{d\Delta H}{dt} + c_2 f_2 \cdot \sqrt{\frac{g}{2 H_0}} \cdot \Delta H = \Delta Q_1. \quad (2.40)$$

Приведемо рівняння (2.40) до виду

$$T \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = k \Delta Q_1.$$

Помножимо ліву і праву частини рівняння (2.40) на $\frac{1}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2 H_0}{g}}$,

отримаємо:

$$\frac{S}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}} \cdot \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = \frac{1}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}} \cdot \Delta Q_1.$$

$$T = \frac{S}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}}, \quad k = \frac{1}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}}. \quad (2.41)$$

Отже, постійна часу пропорційна площі січення ємності, кореню квадратному з рівня і обернено пропорційна січенню зливного клапана.

Розрахуємо параметри (сталу часу, коефіцієнт передачі) керуючого колодязя діаметром $D=2$ м, якщо діаметр зливного колектора $d=0.15$ м, коефіцієнт витрати водовипускного клапана $c_2 = 0.6$, глибина колодязя $H_0 = 2$ м.

Площа поперечного перерізу колодязя:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 2^2}{4} = 3.14 (\text{м}^2)$$

Площа поперечного перерізу зливного колектора:

$$f_2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.15^2}{4} \approx 0.0177 (\text{м}^2)$$

Стала часу колодязя: $T = \frac{S}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}}.$

$$[T] = \frac{\text{м}^2}{\text{м}^2} \sqrt{\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}} = \text{с}; \quad T = \frac{S}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}} = \frac{3.14}{0.6 \cdot 0.0177} \sqrt{\frac{2 \cdot 2}{9.81}} \approx 188.8 (\text{с}) \approx 3.15 (\text{хв.})$$

$= 0.0524 (\text{год.}).$

Коефіцієнт передачі колодязя за каналом $\Delta Q_1 \rightarrow \Delta H$: $k = \frac{1}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}}.$

$$[k] = \frac{1}{m^2} \sqrt{\frac{m \cdot c^2}{m}} = \frac{m}{m^3/c};$$

$$k = \frac{1}{c_2 f_2} \sqrt{\frac{2H_0}{g}} = \frac{1}{0.6 \cdot 0.0177} \sqrt{\frac{2 \cdot 2}{9.81}} = 60.13 \left(\frac{m}{m^3/c} \right) = 0.0167 \left(\frac{m}{m^3/200} \right)$$

Отже, функція передачі керуючого колодязя має вигляд:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1} = \frac{60.13}{188.8 \cdot s + 1} \quad (2.42)$$

Математична модель виконавчого механізму та регулюючого органу.

У регуляторі вологості кореневого шару ґрунту [67], який встановлений на колекторі у дренажному колодязі, що знаходиться на ґрунтовому масиві і має чутливий елемент та запірний орган з двома еластичними камерами, робочою та підсилюючою, які зв'язані гідравлічно з колектором і колодязем. Еластичні камери гідравлічно ізольовані між собою і зв'язані з колектором через електромагнітні клапани і трубки ежекторів, а з колодязем – через електромагнітні клапани. Підсилююча камера окремо зв'язана з атмосферою через електромагнітний клапан. При роботі регулятора в режимі затримки дренажного стоку за рахунок ефекту ежекції прискорюється злив води з еластичних камер, що зменшує інерційність відкриття запірного органу. В подальшому при проходженні води з колодязя в канал через колектор в камерах підтримується розрідження, забезпечуючи надійне відкриття запірного органу. Час повного відкриття регулюючого органу складає десяті частини секунди. Оскільки інерційність усієї АСК значно більша, пропонується представити функцію передачі виконавчого механізму та регулюючого органу у вигляді пропорційної ланки.

$$W_{BM,PO}(s) = k = \frac{\Delta Q_1}{U_C} = \frac{0.03326 \frac{m^3}{c}}{10B} = 0.003326 \left(\frac{m^3}{B \cdot c} \right)$$

$$W_{BM,PO}(s) = k = \frac{\Delta Q_1}{U_C} = \frac{119.736 \text{ м}^3 / \text{год.}}{10B} = 11.9736 \left(\frac{\text{м}^3}{B \cdot \text{год.}} \right)$$

Математична модель колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту. Згідно зі структурною схемою рис. 2.2, об'єкт керування №2.1 відображає колекторно-дренажну систему та насичену зону ґрунту і перетворює рівень води у керуючому колодязі на напір у дренажній системі (ОК2.1.1), а напір – на РГВ (ОК2.1.2).

З аналізу експериментальних кривих зміни напору у колекторно-дренажній системі [33] при зміні рівня води у керуючому колодязі, а також зміни РГВ при зміні напору у колекторно-дренажній системі (рис. 2.47, 2.48), отримаємо наступний вигляд функції передачі об'єкта:

$$W_{2.1} = \frac{k_{2.1}}{(T_{2.1.1} \cdot s + 1) \cdot (T_{2.1.2} \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (2.43)$$

$$T_{2.1.1} = 2.5(\text{год.}) = 9000(c), \quad T_{2.1.2} = 13(\text{год.}) = 46800(c), \quad \tau_{2.1} = 2.5(\text{год.}) = 9000(c).$$

При збільшенні рівня води у водозабірному колодязі спочатку відбувається інтенсивне наростання напорів у регулюючих дренах за експоненціальним законом, яке в подальшому сповільнюється. Зміна РГВ у міждренні відбувається з постійним запізненням, що обумовлено формуванням депресійної кривої, після чого відбувається плавна зміна РГВ, який наближається до рівня води у колодязі. Транспортне запізнення зростає по мірі віддалення від регулюючої дрени, досягає максимуму у міждренні і залежить від міждренних відстаней і водопроникності ґрунту. Функції передачі об'єкта при осушенні представляють собою суму спадаючих експонент, зміщених на величину транспортного запізнення. При періодичних змінах РГВ у процесі автоматичного регулювання час транспортного запізнення при зростанні РГВ значно зменшується, що позитивно впливає на якість регулювання.

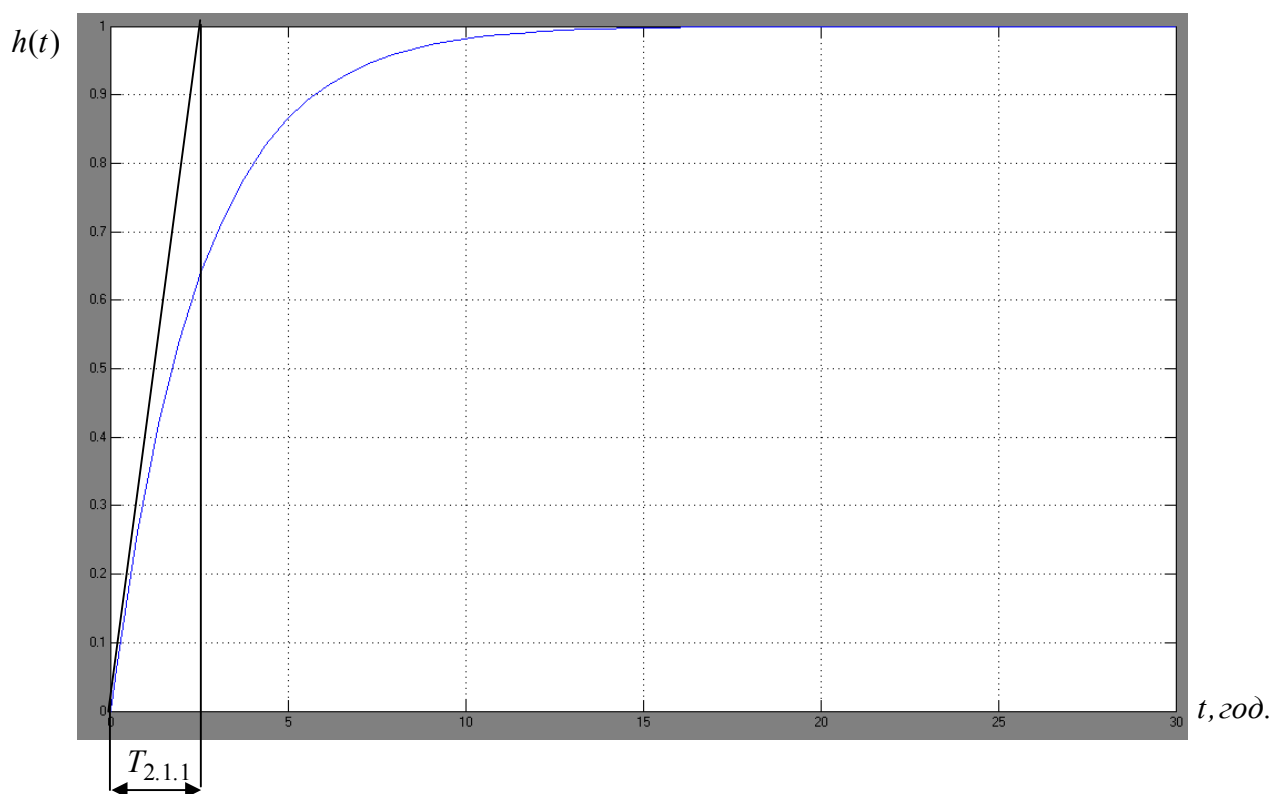


Рисунок 2.47 – Перехідний процес зміни напору у колекторно-дренажній системі при зміні рівня води у керуючому колодязі

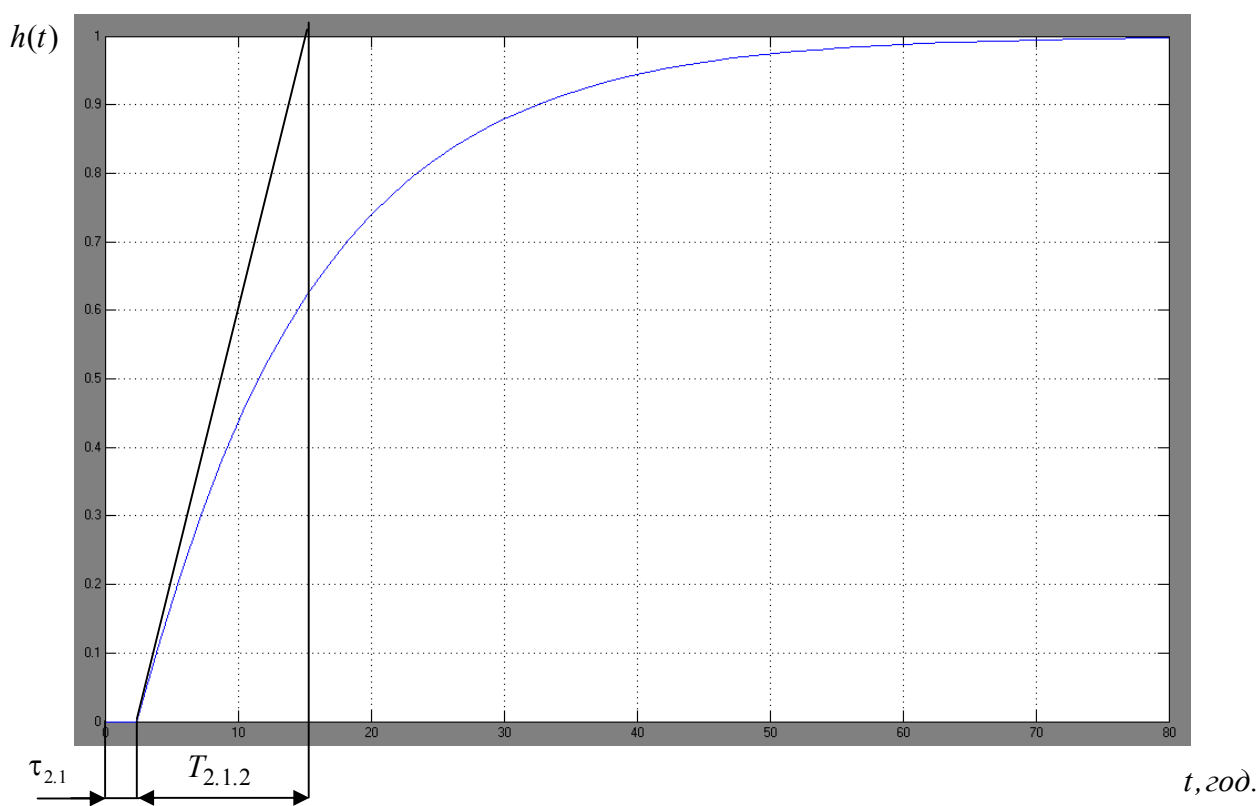


Рисунок 2.48 – Перехідний процес зміни РГВ при зміні напору у колекторно-дренажній системі

2.8 Основні результати і висновки до розділу

1. У розділі наведено структуру ОЗС Рівненської дослідної сільськогосподарської станції, визначено фактори впливу на ріст та розвиток сільськогосподарських культур, зокрема аерації, температури, вологості, рівня ґрунтових вод.

2. Розроблено каскадно-комбіновану структурну схему автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні за допомогою зміни рівня ґрунтових вод.

3. Розроблено нові прогнозуючі математичні моделі вологопереносу у ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі статичних багат шарових штучних нейронних мереж прямого розповсюдження різної архітектури та нео-фаззі мереж, виконано їх порівняльний аналіз. Побудовані нейромоделі використовуються для перевірки ефективності роботи різних методів керування, а також у складі автоматизованого робочого місця диспетчера ОЗС і служать зручним інструментом для планування і керування режимами зволоження сільськогосподарських культур.

4. Проведено розрахунок коефіцієнта вологопровідності ґрунту на основі емпіричних формул та нейронних мереж. Розроблений новий метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі статичних багат шарових штучних нейронних мереж прямого розповсюдження дозволив підвищити точність його визначення.

5. Виконано математичне моделювання ненасиченої зони ґрунту на основі рівняння вологопереносу методом Ньютона-Рафсона, здійснено порівняльний аналіз з результатами роботи нейронних моделей.

6. Проведено розрахунок математичної моделі колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ ПІДГРУНТОВОМУ ЗВОЛОЖЕННІ

3.1 Розробка методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі нейронних мереж

3.1.1 Розробка методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення

При керуванні всмоктуючим тиском ґрунту при визначенні конкретного значення уставки РГВ на наступний період керування необхідно враховувати поточний стан об'єкта та випадково змінні метеопараметри. Використаємо механізм нейронних мереж для визначення РГВ, який необхідно утримувати на модульній ділянці ОЗС протягом розрахункового періоду для забезпечення заданого значення всмоктуючого тиску ґрунту. В якості вхідних параметрів пропонуються наступні:

- попереднє та поточне значення РГВ;
- дані метеопрогнозу на наступний період керування: кількість опадів, температура та відносна вологість повітря;
- уставка по всмоктуючому тиску ґрунту.

Побудуємо наступні НМ:

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_k, W_{k+1}^h), \quad (3.1)$$

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h), \quad (3.2)$$

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), всмоктуючий тиск W^h (м) у визначеному шарі ґрунту h .

Вихідним параметром є рівень ґрунтових вод L від світлової поверхні (м). $NN()$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок.

Проведемо дослідження НМ (3.1) і (3.2) у нейроемуляторі NeuroPro аналогічно, як і у розділі 2. Параметри НМ: кількість шарів нейронів – 3, число нейронів у кожному шарі – 10, передаточні функції нейронів – сигмоїдні, діапазон зміни ваг адаптивних зв'язків між нейронами – [-1; 1]. Результати навчання і тестування НМ наведено у таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати навчання і тестування багатошарових нейромереж для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту

| № | Нейромережа | Задаючий шар ґрунту | К-сть входів | К-сть кроків | | СКВ, м | | Нейро-емулятор |
|-----|--------------|---------------------|--------------|--------------|------------|----------|------------|----------------|
| | | | | навчання | тестування | навчання | тестування | |
| 1.1 | Багатошарова | 0-10 см | 4 | 173 | 173 | 0.006 | 0.114 | NeuroPro |
| 1.2 | | | 5 | | | 0.002 | 0.1 | |
| 2.1 | | 10-20 см | 4 | | | 0.006 | 0.122 | |
| 2.2 | | | 5 | | | 0.003 | 0.085 | |
| 3.1 | | 30-40 см | 4 | | | 0.009 | 0.091 | |
| 3.2 | | | 5 | | | 0.004 | 0.104 | |

Як видно з таблиці 3.1, введення передісторії на один крок по РГВ у більшості випадків покращує точність роботи нейромереж. Лише при задачі підтримувати заданий всмоктуючий тиск у нижньому шарі ґрунту $h=30-40$ см нейромережа з 4-ма входами незначно випереджає за точністю нейромережу з 5-ма входами на тестувальній вибірці даних. Нарощування передісторії далі не є доцільним, оскільки з ростом змінних ускладнюється структура мережі та технологія її навчання. Результати тестування багатошарових нейромережі з 4-ма та 5-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту наведено на рис. 3.1 та 3.2.



Рисунок 3.1 – Результати тестування багатошарової неймережі з 4-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см:

— — тестувальна вибірка даних, - - - - результати роботи неймережі



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Результати тестування багатошарової неймережі з 5-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см:

— тестувальна вибірка даних, - - - результати роботи неймережі

Вагомість вхідних сигналів при навчанні та тестуванні багатошарових нейромереж з 4-ма та 5-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту $h=0-10$ см, $h=10-20$ см, $h=30-40$ см наведено у додатку Ж. Середні значення вагомості вхідних параметрів при навчанні і тестуванні нейромереж з 4-ма та 5-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту та представлено на діаграмах (рис. 3.3).

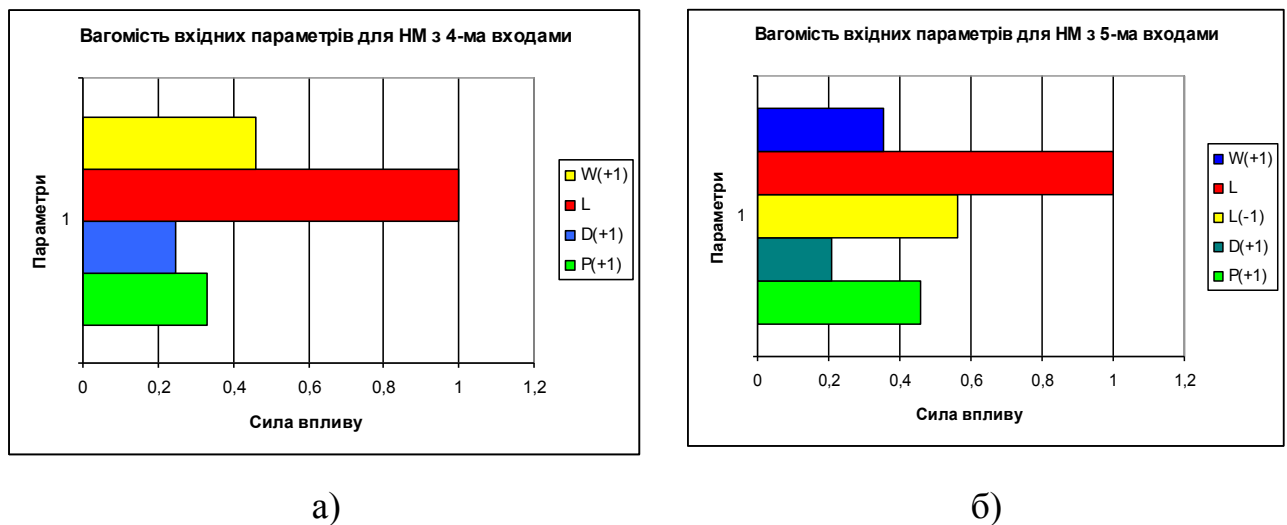


Рисунок 3.3 – Вагомість вхідних параметрів для багатошарової нейромережі для визначення РГВ: а – з 4-ма входами, б – з 5-ма входами

Як бачимо, найбільший вплив на вихід нейромережі з 4-ма вхідними параметрами мають поточне значення РГВ, завдання по всмоктуючому тиску ґрунту та метеопрогноз по опадах. Для мережі з 5-ма входами найважливішими параметрами є поточне та попереднє значення РГВ, метеопрогноз по опадах та завдання по всмоктуючому тиску ґрунту. В обох мережах найменший вплив на вихідний сигнал має метеопрогноз по дефіциту вологості повітря, проте він є достатньо значимий для того, щоб його лишити у якості входу.

Як і у розділі 2, проведемо дослідження роботи нейромереж з різною кількістю нейронів прихованого шару та різними функціями передачі нейронів у редакторі Neural Network Toolbox системи MatLab. Усі розрахунки проведемо для мережі виду (3.2) для шару ґрунту $h=0-10$ см:

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h)$$

Вплив функції навчання багат шарової нейромережі для визначення РГВ на точність її роботи наведено у таблиці 3.2. Отже, як видно із таблиці 3.2, найкращий результат отримуємо при використанні функції, що реалізує різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere, - 0.0967 м.

Проведемо дослідження впливу виду функції активації прихованого шару НМ для визначення РГВ на точність її роботи аналогічно до дослідження у розділі 2. Побудуємо двошарові НМ з такими ж параметрами, але методом навчання, що реалізує різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere ('traincgp'). Результати дослідження наведено у таблиці 3.3 та на рис. 3.4.

Як видно з таблиці 3.3, найкращу точність роботи нейромережі отримуємо при сигмоїдних (логістичних) функціях активації нейронів прихованого шару, приблизно на 0.01 одиницю відрізняється точність при використанні тангенціальних та радіально-базисних функцій. Отже, будемо використовувати в подальшому сигмоїдну (логістичну) функцію передачі.

Результати тестування нейромереж для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарі h=0-10 см архітектури 5-3-1 з різними функціями активації нейронів наведено на рис. 3.5.

Дослідимо вплив кількості нейронів прихованого шару нейрорегуляторів на точність їх роботи аналогічно, як у розділі 2. У якості методу навчання при цьому використаємо різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere ('traincgp'). Змінюватимемо кількість нейронів прихованого шару від 1 до 20 і аналізуватимемо точність роботи мережі на тестувальній вибірці даних. Результати дослідження наведено на рис. 3.6. Як видно з рис. 3.6, у прихованому шарі нейромережі достатньо трьох нейронів.

Таблиця 3.2 – Вплив функції навчання НМ для визначення РГВ на точність її роботи

| № | Функція навчання нейромережі | Запис функції | СКВ на тестувальній вибірці даних, м |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| 1 | Різновид квазіньютонівського алгоритму зворотного поширення помилки (BFGS) | trainbfg | 0.1228 |
| 2 | Байєсівський метод навчання | trainbr | 0.1472 |
| 3 | Різновид алгоритму спряження градієнтів (метод Powell-Beal) | traincgb | 0.1126 |
| 4 | Різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Флетчера-Поуелла | traincgf | 0.1208 |
| 5 | Різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere | traincgp | 0.0967 |
| 6 | «Класичний» алгоритм зворотного поширення помилки | traingd | 0.2411 |
| 7 | «Класичний» алгоритм зворотного поширення помилки з адаптацією коефіцієнта швидкості навчання | traingda | 0.2430 |
| 8 | Модифікований алгоритм зворотного поширення помилки із введеною «інерційністю» корекції ваг і зміщень | traingdm | 0.2672 |
| 9 | Комбінований алгоритм навчання, який об'єднує особливості двох попередніх | traingdx | 0.1179 |
| 10 | Функція, що повертає ваги і зміщення мережі, використовуючи алгоритм Левенберга-Марквардта | trainlm | 0.1260 |
| 11 | Різновид алгоритму зворотного поширення помилки з використанням метода січних | trainoss | 0.1856 |
| 12 | Гнучкий алгоритм зворотного поширення помилки (RPROP) | trainrp | 0.1279 |
| 13 | Функція, що повертає ваги і зміщення мережі, використовуючи алгоритм масштабованих спряжених градієнтів | trainscg | 0.1210 |
| 14 | Функція, що корегує ваги і зміщення мережі у відповідності із заданою функцією навчання нейронів | trainwb | 0.1967 |
| 15 | Функція, що аналогічна попередній, але одночасно на вхід мережі пред'являється тільки один вектор входу | trainwbl | 0.2334 |

Таблиця 3.3 – Вплив виду функції активації прихованого шару НМ для визначення РГВ на точність її роботи

| № | Функція активації нейронів прихованого шару нейромережі | Формула | Область значень | Запис функції | СКВ на тестувальній вибірці даних, м |
|---|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| 1 | Сигмоїдна логістична функція | $f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$ | (0; 1) | logsig | 0.0967 |
| 2 | Радіально-базисна (гаусова) | $f(s) = e^{-s^2}$ | (0; 1) | radbas | 0.1114 |
| 3 | Гіперболічний тангенс (сигмоїдна) | $f(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$ | (-1; 1) | tansig | 0.1106 |
| 4 | Трикутна | $f(s) = \begin{cases} 1 - s , & s \leq 1, \\ 0, & s > 1. \end{cases}$ | (0; 1) | tribas | 0.1260 |

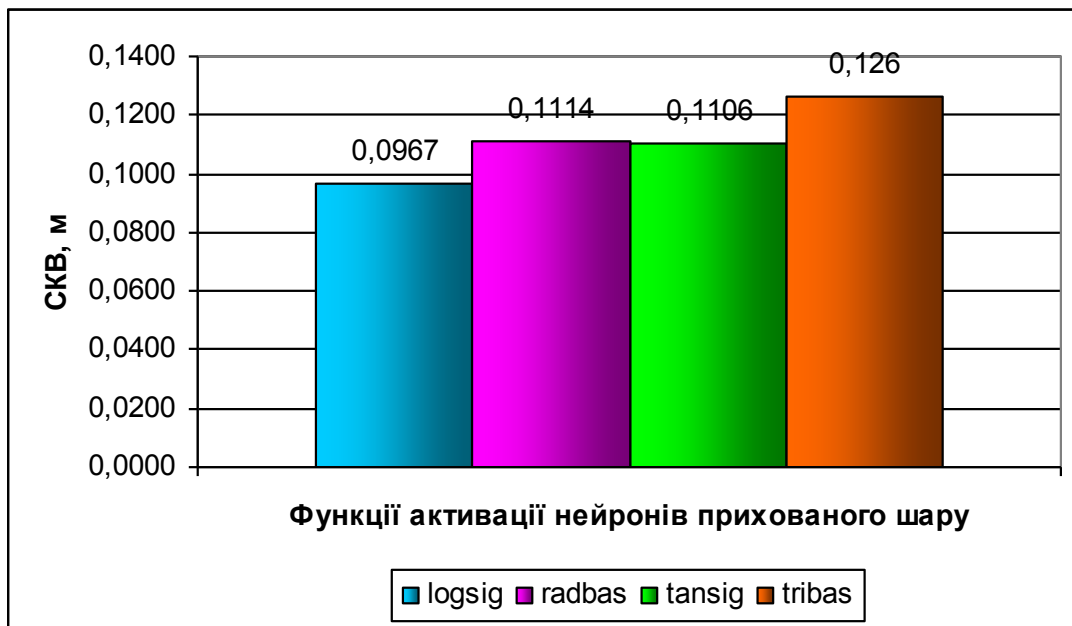
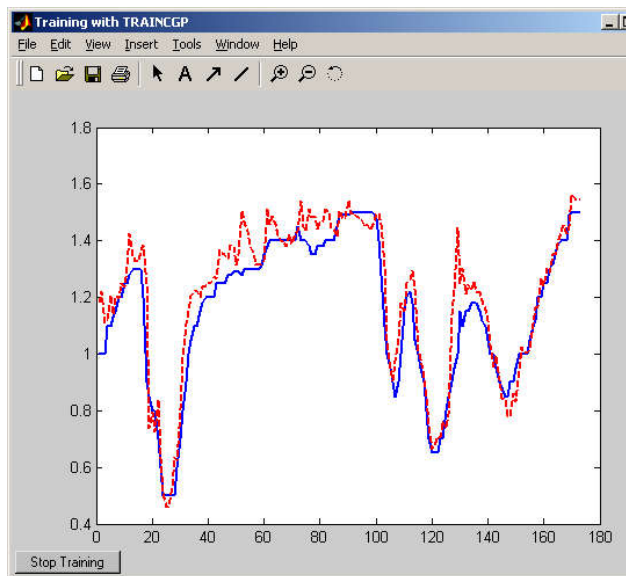
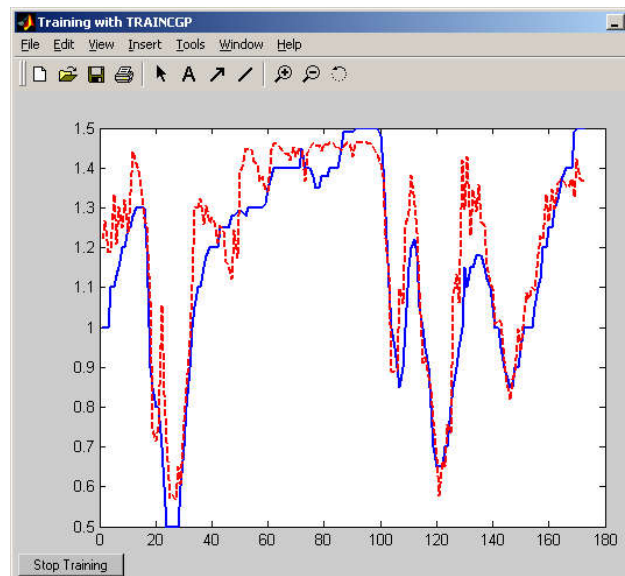


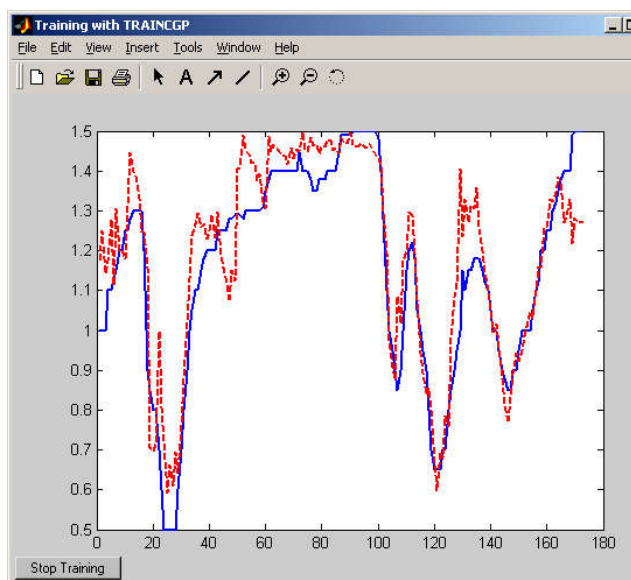
Рисунок 3.4 – Залежність точності роботи двошарової НМ для визначення РГВ від виду функції активації прихованого шару



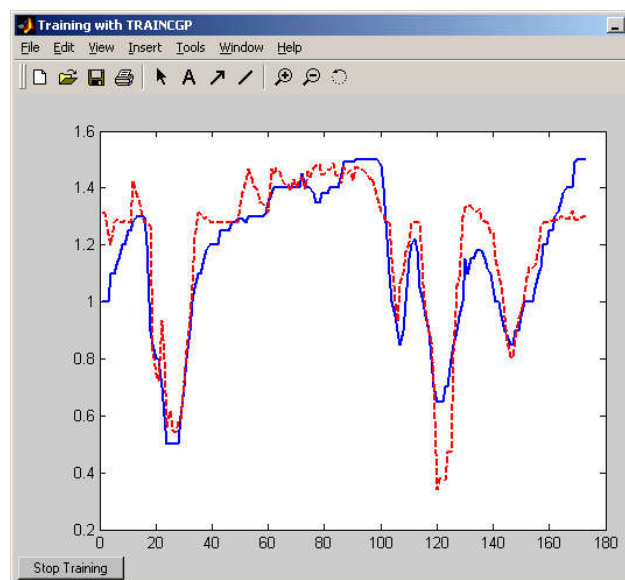
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.5 – Результати тестування нейромереж для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарі $h=0-10$ см архітектури 5-3-1: а – Logsig-Purelin, б – Radbas-Purelin, в – Tansig-Purelin, г – Tribas-Purelin:

————— – тестувальна вибірка даних, - - - - - – результати роботи НМ



Рисунок 3.6 – Залежність точності роботи нейромережі архітектури 5-n-1, Logsig-Purelin від кількості нейронів прихованого шару

Дослідимо вплив нарощування кількості шарів нейронів на точність роботи нейрорегуляторів. Для цього побудуємо тришарові нейромережі, як і у розділі 2. Результати дослідження наведено на рис. 3.7. На рис. 3.8 наведено результати тестування нейромережі архітектури 5-3-1-1, Logsig-Logsig-Purelin для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарі $h=0-10$ см.

Як видно з рис. 3.7, у другому прихованому шарі нейромережі достатньо одного нейрона. Разом з тим, введення другого прихованого шару не покращує якість роботи нейромережі. Тому для визначення рівня РГВ, необхідного для забезпечення потрібного значення всмоктуючого тиску ґрунту, доцільно використовувати двошарові нейромережі.

Під час росту рослини проходять декілька фаз розвитку, протягом яких відбувається розвиток як наземної, так і підземної (кореневої) частин. У зв'язку з цим розроблено декілька регуляторів виду (3.2), орієнтованих на керування вологістю ґрунту у певному його шарі (0-10, 10-20, 30-40 см). Перемикання між регуляторами здійснюється по мірі розвитку кореневої системи рослини.



Рисунок 3.7 – Залежність точності роботи неймережі архітектури 5-3-n-1, Logsig-Logsig-Purelin від кількості нейронів другого прихованого шару

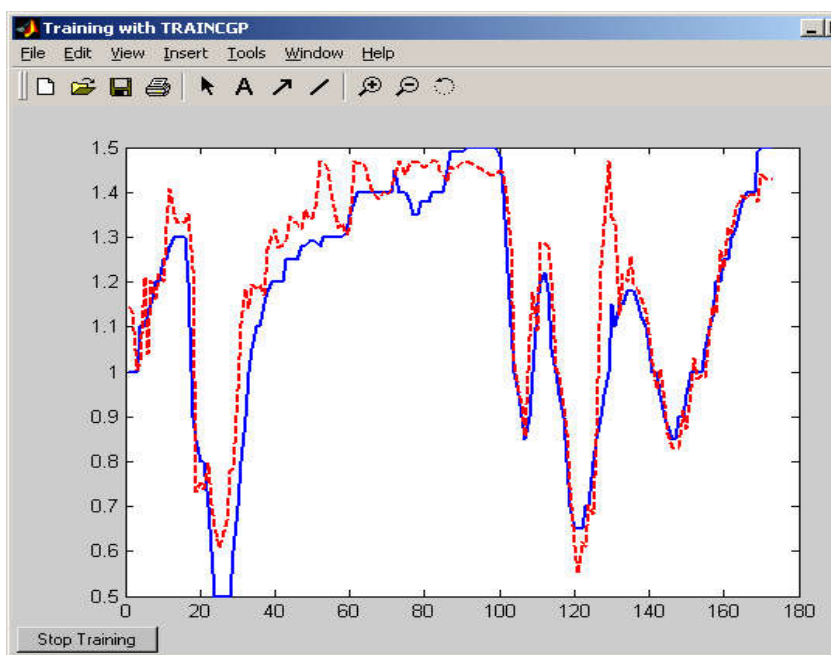


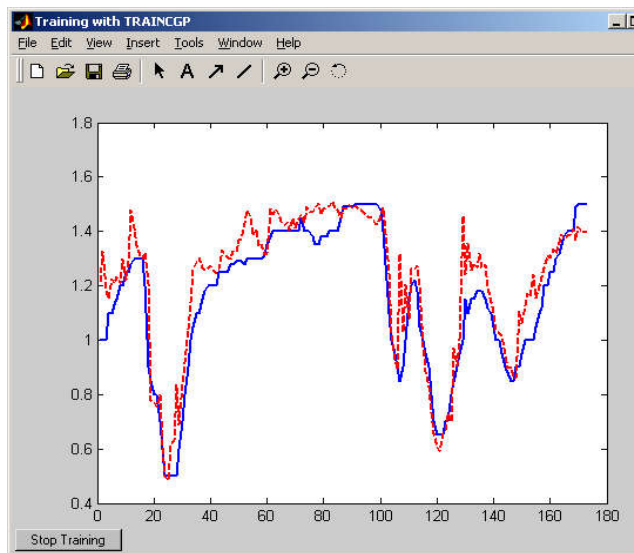
Рисунок 3.8 – Результати тестування неймережі архітектури 5-3-1-1, Logsig-Logsig-Purelin для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарі $h=0-10$ см: — тестувальна вибірка даних, - - - результати роботи неймережі

Побудуємо нейрорегулятори для визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарах 10-20 та 30-40 см. При цьому

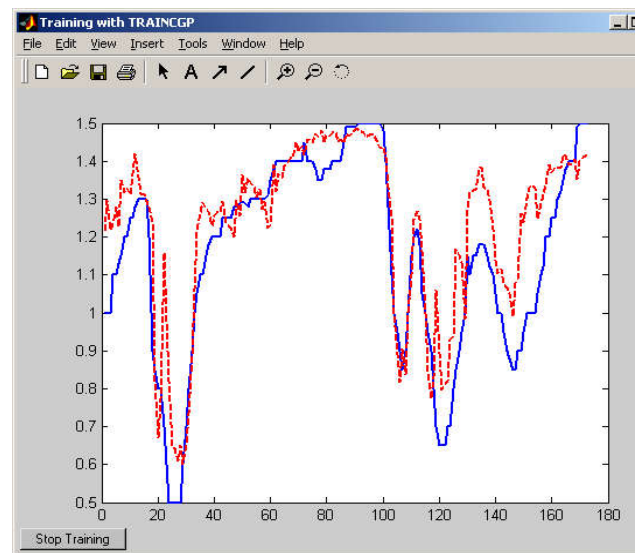
використаємо НМ виду: кількість нейронів першого шару – 3, функції активації нейронів першого шару – сигмоїдні ('logsig'), кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна ('purelin'), метод навчання, що реалізує різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere ('traincgp'), функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою ('learngdm'), функція помилки – квадратична ('mse'). Результати роботи нейрорегуляторів архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарах 10-20 см та 30-40 см наведено на рис. 3.9. Результати роботи нейрорегуляторів наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати роботи нейрорегуляторів архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для визначення РГВ

| Задаючий шар ґрунту | Кількість точок | Середньоквадратичне відхилення, м | |
|---------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|
| | | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 173 | 0.1272 | 0.0967 |
| h=10-20 см | | 0.1356 | 0.1129 |
| h=30-40 см | | 0.1333 | 0.1393 |



а)



б)

Рисунок 3.9 – Результати тестування нейромережі архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарах: а – h=10-20 см, б – h=30-40 см: ———— – тестувальна вибірка даних, - - - - - – результати роботи нейромережі

3.1.2 Розробка методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі нео-фаззі мереж

Застосуємо гібридну нейро-нечітку мережу на основі нео-фаззі нейрона для визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту (0-10, 10-20 та 30-40 см). Для цього сформуємо навчальну і тестувальну вибірки дані по 173 точок у кожній за два різні вегетаційні періоди. На основі нео-фаззі нейрона (2.3) для різних шарів ґрунту (0-10, 10-20 та 30-40 см) створимо моделі виду:

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h),$$

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), всмоктуючий тиск W^h (м) у визначеному шарі ґрунту h . Вихідним параметром є рівень ґрунтових вод L від світлової поверхні (м). $NN(\)$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок.

При цьому розіб'ємо кожну змінну на 6 рівних інтервалів з трикутними функціями належності (рис. 3.10-3.13), які задовольняють вимозі (2.6). Програмне забезпечення для навчання та тестування нео-фаззі регуляторів для визначення РГВ розроблено мовою C++. Вікно форми програми представлено на рис. 3.14. У таблиці 3.5 наведено дані СКВ при навчанні та тестуванні моделей для різних шарів ґрунту у порівнянні з експериментальними даними.

Таблиця 3.5 – Результати роботи нео-фаззі регуляторів для визначення РГВ

| Задаючий шар ґрунту | Кількість точок | Середньоквадратичне відхилення, м | |
|---------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|
| | | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 173 | 0.04751 | 0.05522 |
| h=10-20 см | | 0.05113 | 0.05895 |
| h=30-40 см | | 0.05464 | 0.06625 |

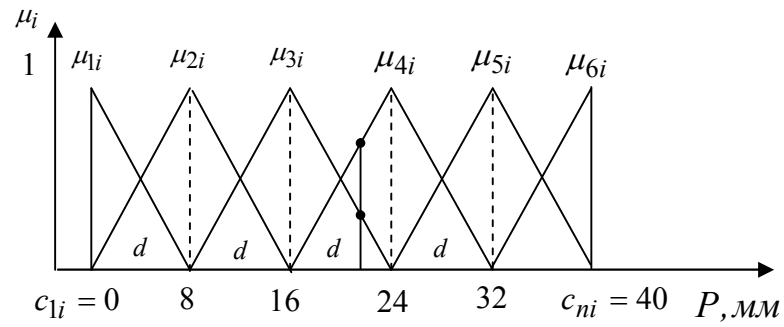


Рисунок 3.10 – Функції належності вхідної змінної «кількість опадів»

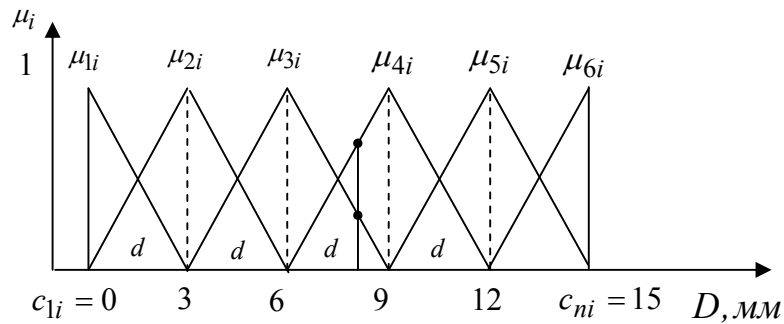


Рисунок 3.11 – Функції належності вхідної змінної «дефіцит вологості повітря»

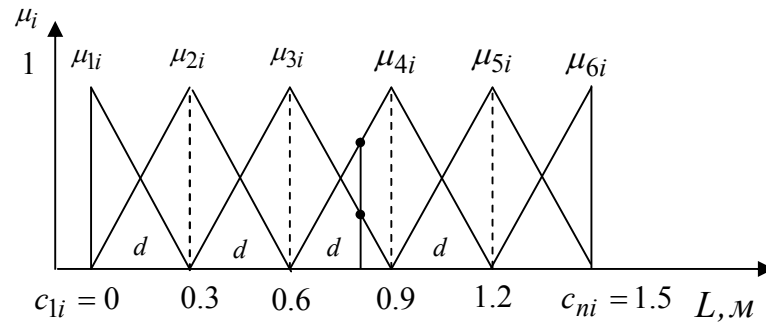


Рисунок 3.12 – Функції належності змінної «РГВ»

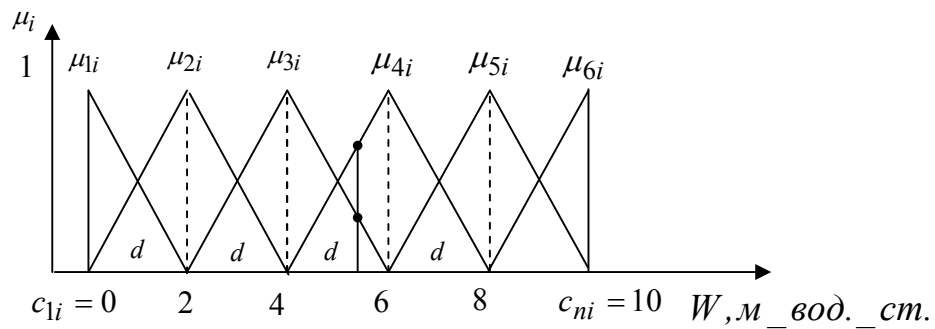


Рисунок 3.13 – Функції належності вхідної змінної «всмоктуючий тиск ґрунту»

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі регулятора для визначення уставки РГВ для підтримування необхідного всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=0-10$ см:

$w_P = 0,866; 0,8732; 0,7922; 0,9601; 0,7299; 0;$
 $w_D = 0,1801; 0,09359; 0,09389; 0,1034; 0,1197; 0;$
 $w_W = 0,008731; 0,04129; 0,01358; 0,02135; -0,05804; 0;$
 $w_{L1} = 0; -0,01062; 0,0007961; -0,01102; 0,01572; 0;$
 $w_{L2} = 0; -0,6887; -0,532; -0,3613; -0,1963; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі регулятора для визначення уставки РГВ для підтримування необхідного всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=10-20$ см:

$w_P = 0,4226; 0,4296; 0,3817; 0,5106; 0,3419; 0;$
 $w_D = 0,1768; 0,1077; 0,1176; 0,127; 0,1448; 0;$
 $w_W = 0,4397; 0,4715; 0,4376; 0,409; 0,3286; 0;$
 $w_{L1} = 0; -0,29; -0,1422; -0,09611; -0,02822; 0;$
 $w_{L2} = 0; -0,4968; -0,3608; -0,2669; -0,1566; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі регулятора для визначення уставки РГВ для підтримування необхідного всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=30-40$ см:

$w_P = 0,3689; 0,3767; 0,3294; 0,4267; 0,2997; 0;$
 $w_D = 0,1317; 0,09257; 0,09829; 0,1046; 0,1176; 0;$
 $w_W = 0,5389; 0,5457; 0,5044; 0,2125; 0; 0;$
 $w_{L1} = 0; -0,176; -0,1704; -0,1485; -0,04922; 0;$
 $w_{L2} = 0; -0,5558; -0,4604; -0,2206; -0,141; 0.$

Згідно таблиці результатів роботи мережі 3.5, максимальне значення СКВ складає 0.06625 м. Приріст або падіння РГВ на 0.07 м спричиняє зменшення або зростання всмоктуючого тиску ґрунту на (0.06-0.2) м вод. ст. відповідно. Приріст всмоктуючого тиску ґрунту ± 0.2 м вод. ст. згідно основної гідрофізичної характеристики відповідає приросту об'ємної вологості ґрунту

$\pm(0.5-1)\%$ в межах робочого діапазону. При керуванні всмоктуючим тиском (вологістю) ґрунту достатньо забезпечити точність $\pm(5)\%$ об'ємної вологості.

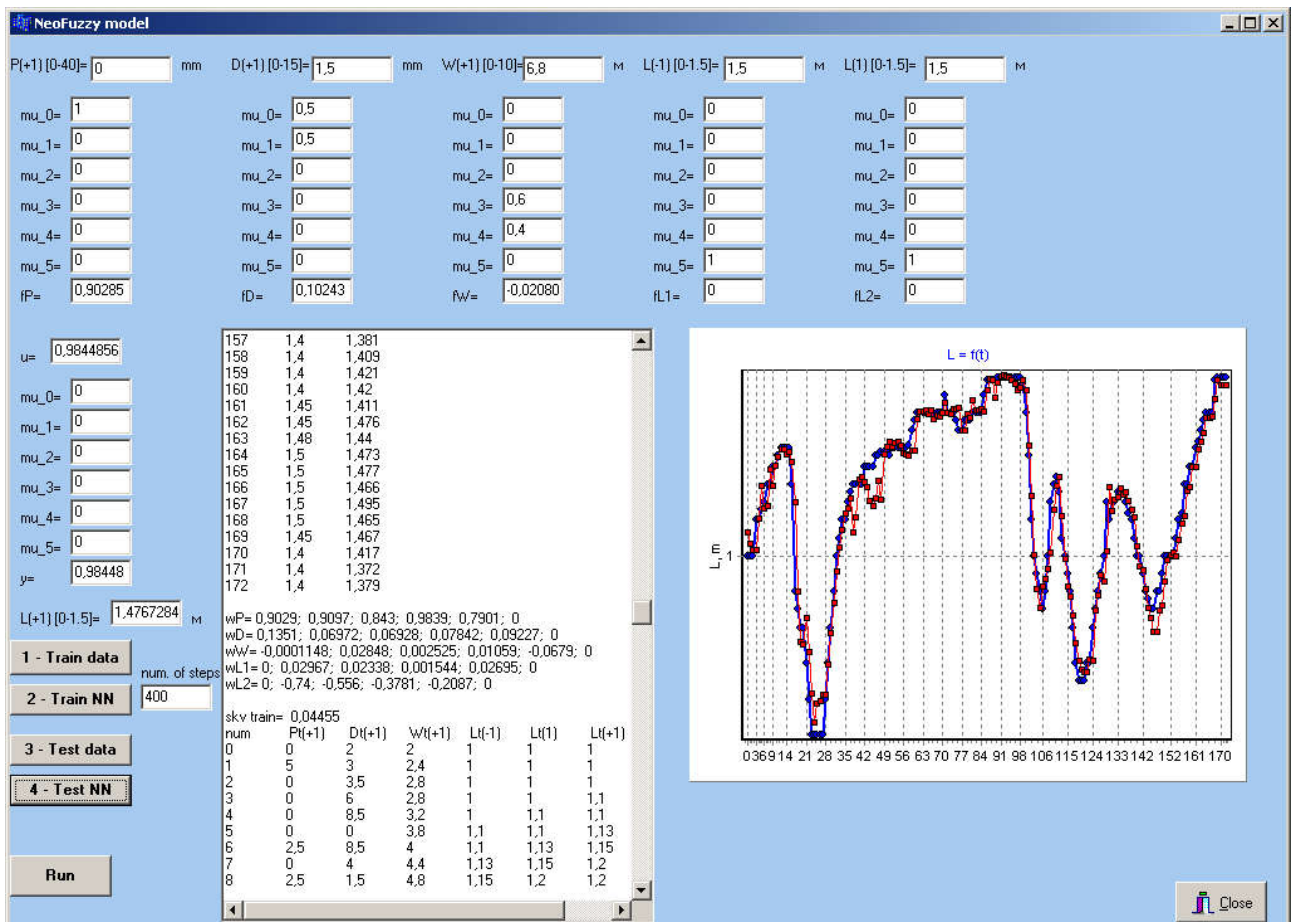


Рисунок 3.14 – Вікно форми програми навчання і тестування нео-фаззі мереж

Виконаємо розрахунок для перевірки адекватності отриманих моделей. Для цього виконаємо розрахунок F-критерію Фішера у програмі Microsoft Excel при рівні значимості $\alpha = 0.05$. Для моделей визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску у всіх трьох шарах ґрунту виконується нерівність $F_{емп.} < F_{кр.}$, як при навчанні, так і при тестуванні моделей (таблиці 3.6-3.8). Тому нульова гіпотеза про рівність генеральних дисперсій на рівні значимості 0.05 приймається, і розроблені моделі є адекватними. Графіки результатів роботи нео-фаззі регуляторів на незалежних тестувальних вибірках даних для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту наведено на рис. 3.15.

Таблиця 3.6 – Нео-фаззі модель визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 0-10 см

| Показник | L(+1) | Lneuro(+1)_train | Lt(+1) | Lneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 1.184 | 1.185 | 1.158 | 1.152 |
| Дисперсія | 0.072 | 0.068 | 0.067 | 0.062 |
| Спостереження | 173.000 | 173.000 | 173.000 | 173.000 |
| df | 172.000 | 172.000 | 172.000 | 172.000 |
| F | 1.063 | | 1.080 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.345 | | 0.308 | |
| F критичне | 1.286 | | 1.286 | |

Таблиця 3.7 – Нео-фаззі модель визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 10-20 см

| Показник | L(+1) | Lneuro(+1)_train | Lt(+1) | Lneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 1.184 | 1.185 | 1.158 | 1.155 |
| Дисперсія | 0.072 | 0.068 | 0.067 | 0.059 |
| Спостереження | 173.000 | 173.000 | 173.000 | 173.000 |
| df | 172.000 | 172.000 | 172.000 | 172.000 |
| F | 1.056 | | 1.141 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.360 | | 0.194 | |
| F критичне | 1.286 | | 1.286 | |

Таблиця 3.8 – Нео-фаззі модель визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 30-40 см

| Показник | L(+1) | Lneuro(+1)_train | Lt(+1) | Lneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 1.184 | 1.193 | 1.158 | 1.174 |
| Дисперсія | 0.072 | 0.068 | 0.067 | 0.064 |
| Спостереження | 173.000 | 173.000 | 173.000 | 173.000 |
| df | 172.000 | 172.000 | 172.000 | 172.000 |
| F | 1.068 | | 1.046 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.334 | | 0.385 | |
| F критичне | 1.286 | | 1.286 | |

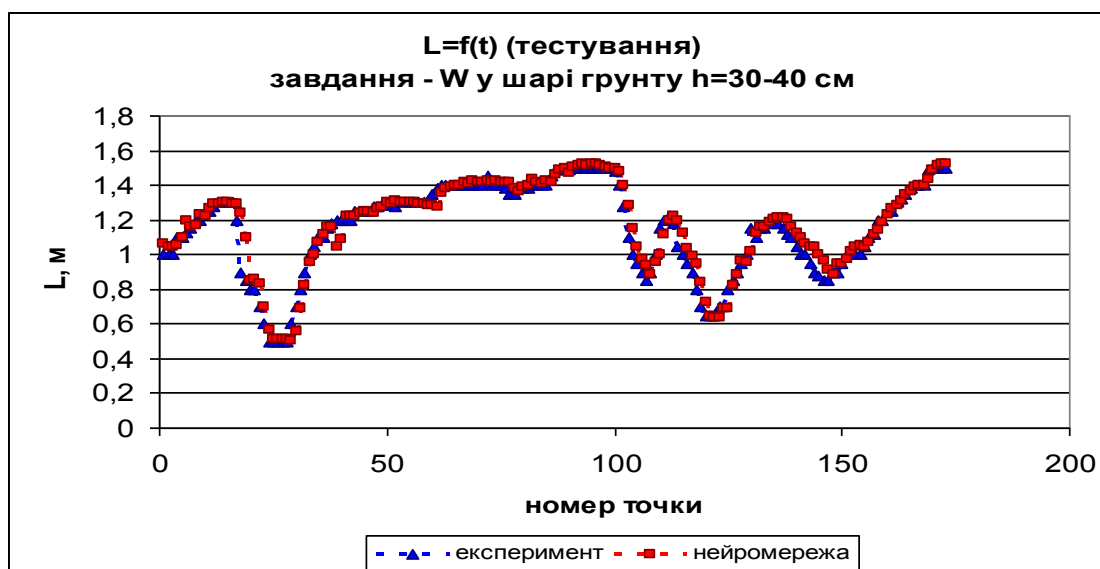
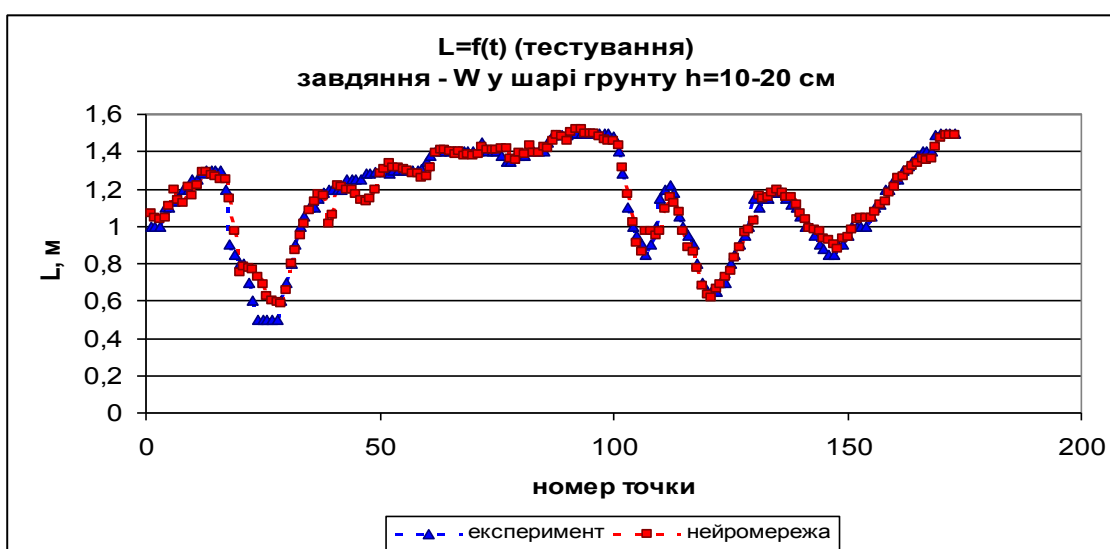
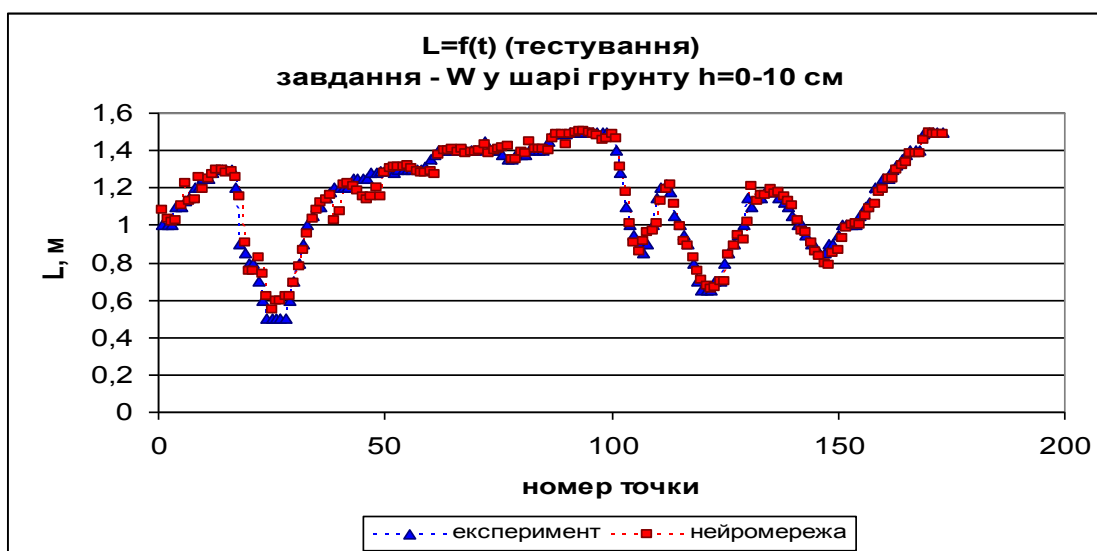


Рисунок 3.15 – Результати тестування нео-фаззі мереж для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у різних шарах (0-10 см, 10-20 см, 30-40 см): 1 – експериментальні дані, 2 – результати роботи нейромережі

Розроблені нео-фаззі моделі для визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску у певному шарі ґрунту забезпечують вищу точність роботи, ніж багат шарові мережі прямого поширення. Водночас вони мають простішу архітектуру, що забезпечує легшу практичну реалізацію та більшу швидкість навчання. Нео-фаззі моделі можуть бути використані у складі автоматизованого робочого місця диспетчера осушувально-зволожувальної системи і служити зручним інструментом для планування і керування режимами зволоження сільськогосподарських культур.

3.2 Моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, дослідження її динамічних властивостей

Моделювання внутрішнього контуру керування. Автоматизована система керування вологозабезпеченістю модульної ділянки за допомогою зміни рівня ґрунтових вод являється каскадно-комбінованою (рис. 2.2). Внутрішнім контуром регулювання є контур регулювання рівня води у дренажному колодязі (об'єкт керування ОК1). Виконаємо моделювання САР внутрішнього контуру за допомогою програми Matlab. Для цього у редакторі Simulink зберемо наступну схему (рис. 3.16).

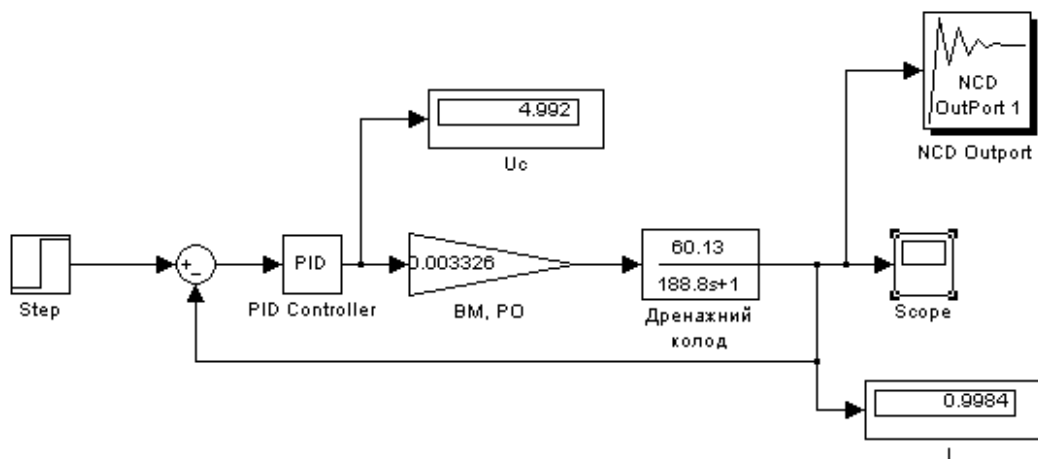


Рисунок 3.16 – САР рівня води у дренажному колодязі

За допомогою блока NCD (рис. 3.16) оптимізуємо значення коефіцієнтів ПД регулятора. Вікно NCD блоку показано на рис. 3.17. Оптимізовані значення коефіцієнтів ПД регулятора внутрішнього контуру: $k_p=3193$, $k_i=0$, $k_d=0$. Перехідна характеристика САР рівня води у дренажному колодязі наведена на рис. 3.18. Система керування виходить на усталене значення, отже, система стійка. Параметри якості перехідного процесу: час регулювання $t=3$ с, запізнення $\tau=0$ с, перерегулювання $\sigma=0\%$, коливальність $n=0$, усталена похибка $\delta_{уст.} = \frac{1-0.9984}{1} \cdot 100 = 0.16\%$.

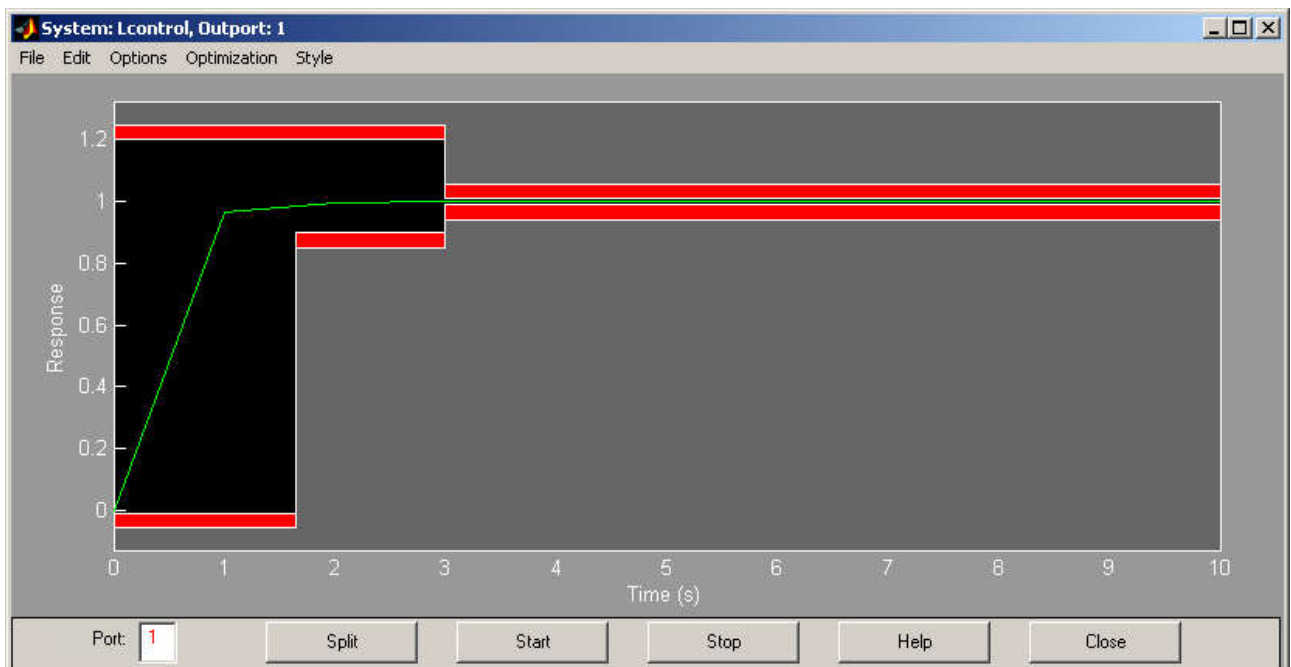


Рисунок 3.17 – Вікно NCD блоку

Проведемо моделювання АСК вологозабезпеченості. Для цього зберемо схему рис. 3.19. Внутрішній контур керування рівнем води у керуючому колодязі наведено на рис. 3.20, об'єкт керування, що відображає колекторно-дренажну систему та насичену зону ґрунту, - на рис. 3.21, структура нео-фаззі регулятора рівня – на рис. 3.22, нео-фаззі модель ненасиченої зони ґрунту для шару $h=0-10$ см – на рис. 3.23.

Детальніше усі Simulink схеми для моделювання системи рис. 3.19 наведено у додатку И.

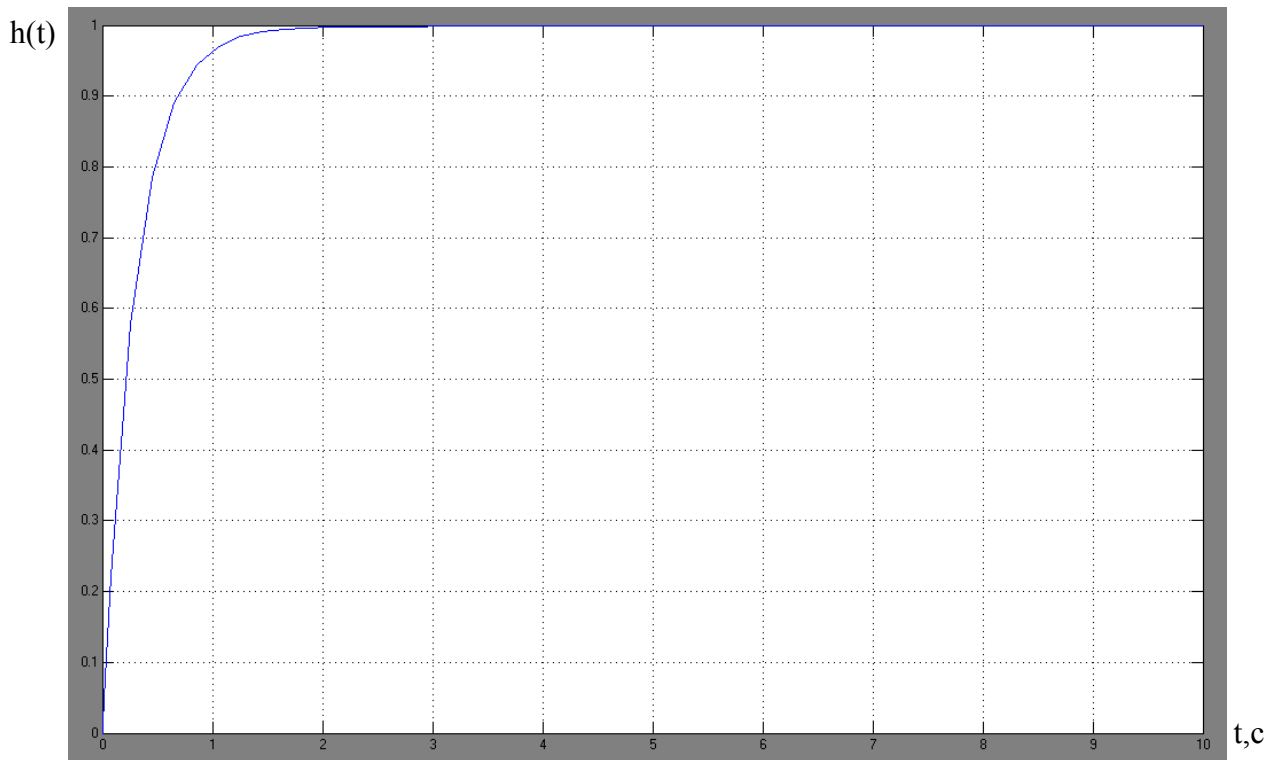


Рисунок 3.18 – Перехідна характеристика САР рівня води у дренажному колодязі

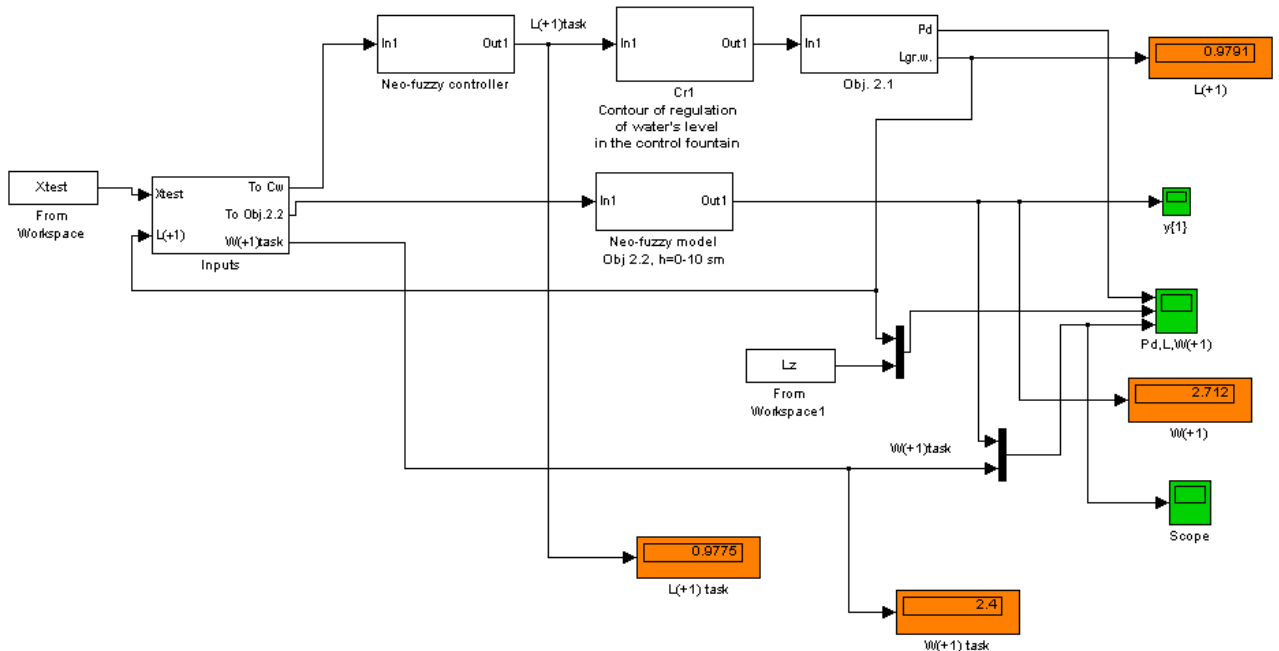


Рисунок 3.19 – Структурна схема АСК вологозабезпеченістю

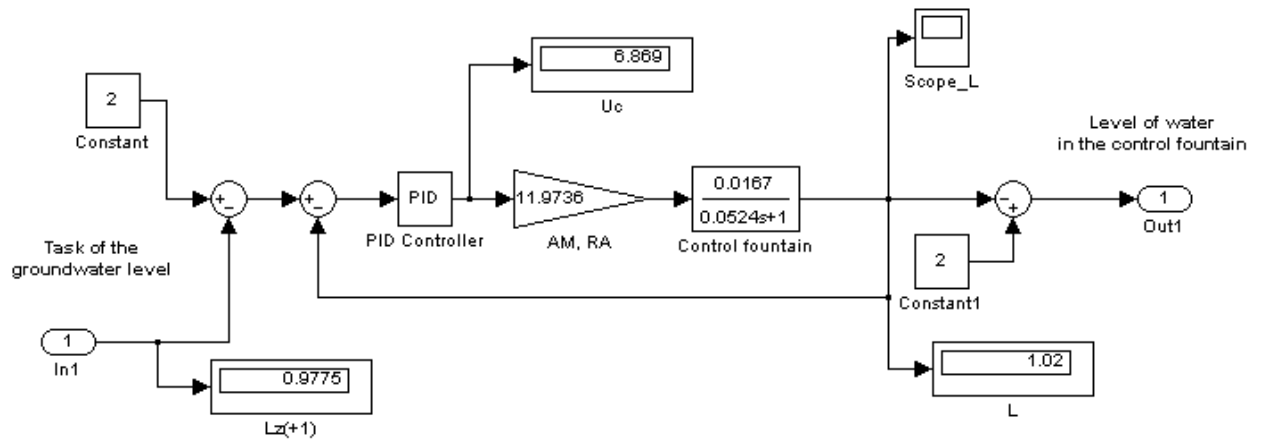


Рисунок 3.20 – Внутрішній контур керування рівнем води у керуючому колодязі

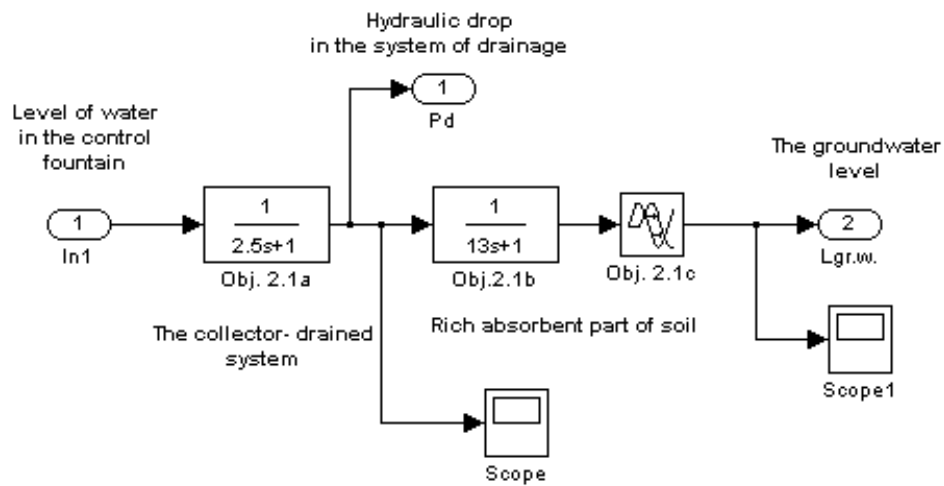


Рисунок 3.21 – Об'єкт керування, що відображає колекторно-дренажну систему та насичену зону ґрунту

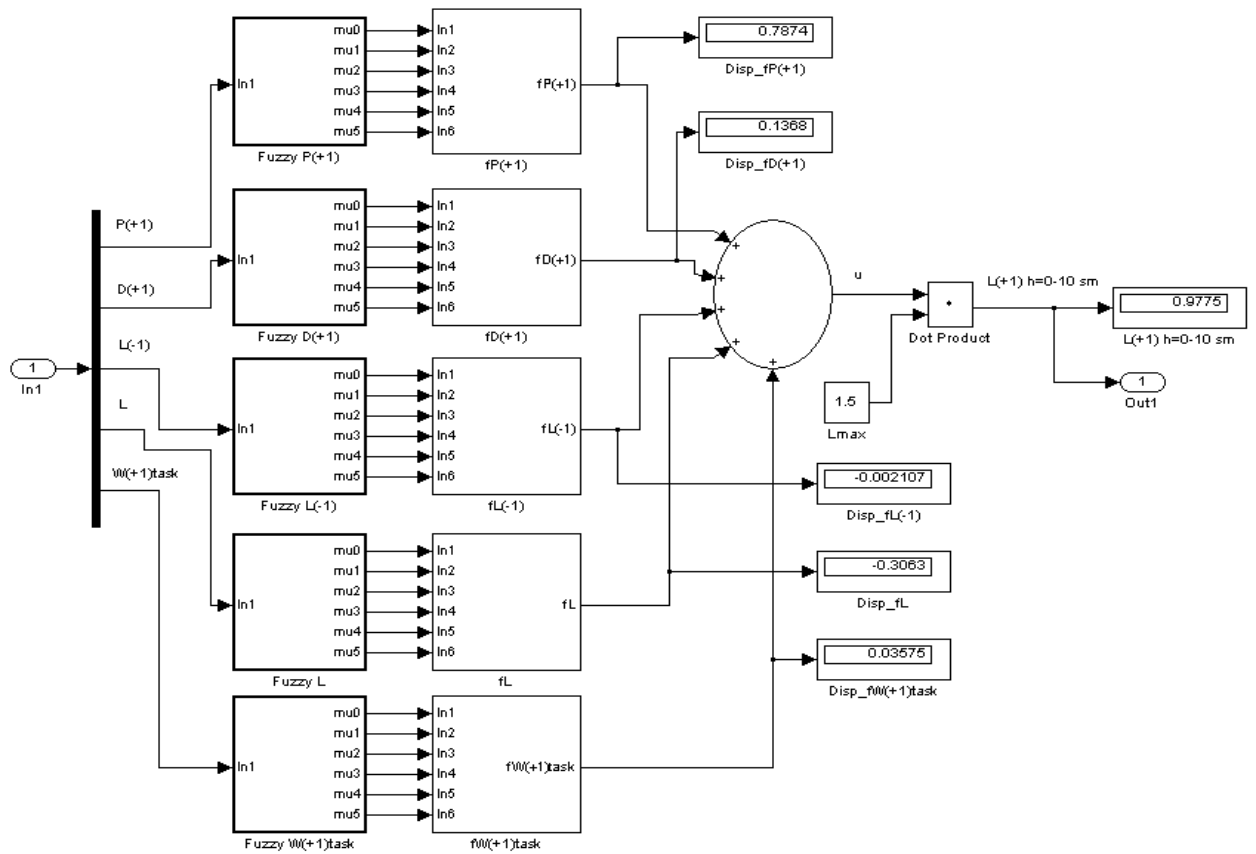


Рисунок 3.22 – Структура нео-фаззі регулятора рівня

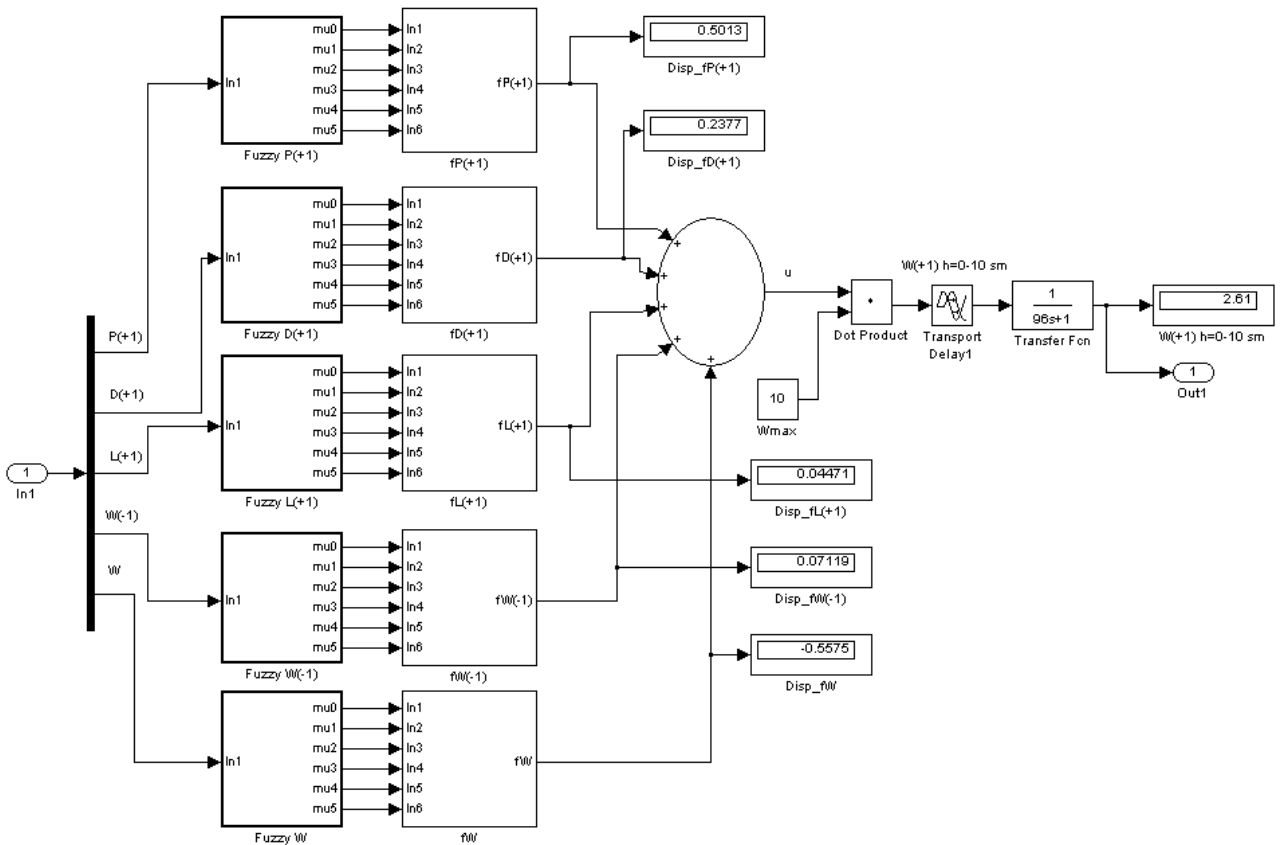


Рисунок 3.23 – Нео-фаззі модель ненасиченої зони ґрунту для шару h=0-10 см

З аналізу експериментальних кривих зміни вологості ґрунту [33] при зміні РГВ отримані значення сталих часу та часу запізнення об'єкта керування, яким є ненасичена зона ґрунту, для різних глибин: $h_1=0-10$ см: $T_1 = 4(\text{добу}) = 96(\text{год.})$, $\tau_1 = 4(\text{добу}) = 96(\text{год.})$; $h_2=10-20$ см: $T_2 = 2.5(\text{добу}) = 60(\text{год.})$, $\tau_2 = 3.5(\text{добу}) = 84(\text{год.})$; $h_3=30-40$ см: $T_3 = 2(\text{добу}) = 48(\text{год.})$, $\tau_3 = 2(\text{добу}) = 48(\text{год.})$. Тому до нео-фаззі моделей ненасиченої зони ґрунту при моделюванні АСК вологозабезпеченості додані аперіодична ланка та ланка транспортного запізнення. Інерційність зміни вологості ґрунту при зміні РГВ тим більша, чим менша глибина ґрунту від світлової поверхні, тобто чим далі знаходиться ґрунт від РГВ. Перехідні характеристики зміни гідравлічного напору в колекторно-дренажній системі, РГВ у міждренні та всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту наведено на рис. 3.24-3.26. При цьому значення вхідних векторів даних і задаючого значення всмоктуючого тиску для різних шарів ґрунту є наступні: для $h=0-10$ см – $P(+1)=30$ мм, $D(+1)=1.5$ мбар, $L(-1)=1$ м, $L=1$ м, $W(-1)=3.4$ м вод. ст., $W=2.6$ м вод. ст., завдання $W(+1)_{\text{task}}=2.4$ м вод. ст.; для $h=10-20$ см – $P(+1)=30$ мм, $D(+1)=1.5$ мбар, $L(-1)=1$ м, $L=1$ м, $W(-1)=2.4$ м вод. ст., $W=1.6$ м вод. ст., завдання $W(+1)_{\text{task}}=0.8$ м вод. ст.; для $h=30-40$ см – $P(+1)=30$ мм, $D(+1)=1.5$ мбар, $L(-1)=1$ м, $L=1$ м, $W(-1)=1$ м вод. ст., $W=0.8$ м вод. ст., завдання $W(+1)_{\text{task}}=0.8$ м вод. ст.

Параметри якості перехідного процесу у шарі ґрунту 0-10 см: час регулювання $t_{\text{рег.}} = 300(\text{год.}) = 12.5(\text{дiб})$, запізнення $\tau = 98.5(\text{год.}) \approx 4.1(\text{добу})$, перерегулювання $\sigma = 0\%$, коливальність $n=0$, усталена похибка $\delta_{\text{уст.}} = \frac{2.61 - 2.4}{2.4} \cdot 100 = 8.75\%$.

Параметри якості перехідного процесу у шарі ґрунту 10-20 см: час регулювання $t_{\text{рег.}} = 300(\text{год.}) = 12.5(\text{дiб})$, запізнення $\tau = 86.5(\text{год.}) \approx 3.6(\text{добу})$, перерегулювання $\sigma = 0\%$, коливальність $n=0$, усталена похибка $\delta_{\text{уст.}} = \frac{0.8 - 0.721}{0.8} \cdot 100 = 9.875\%$.

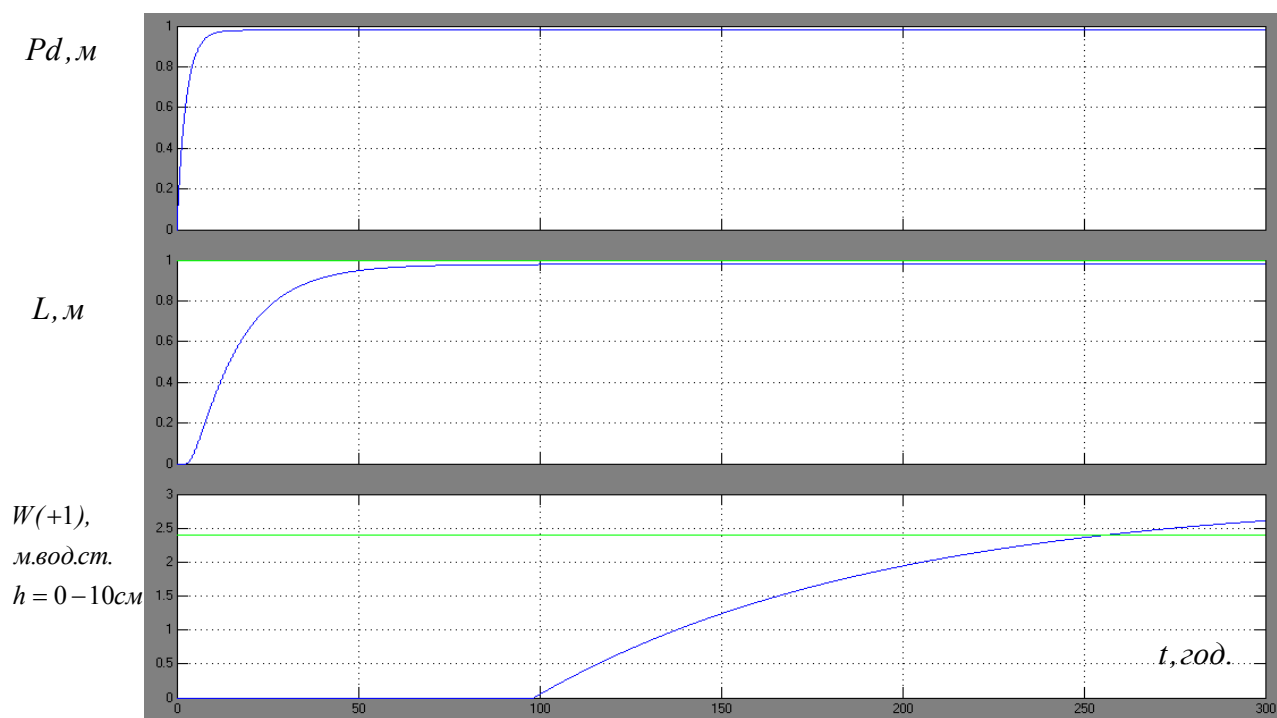


Рисунок 3.24 – Перехідні характеристики зміни гідравлічного напору в колекторно-дренажній системі, РГВ у міждренні та всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=0-10$ см

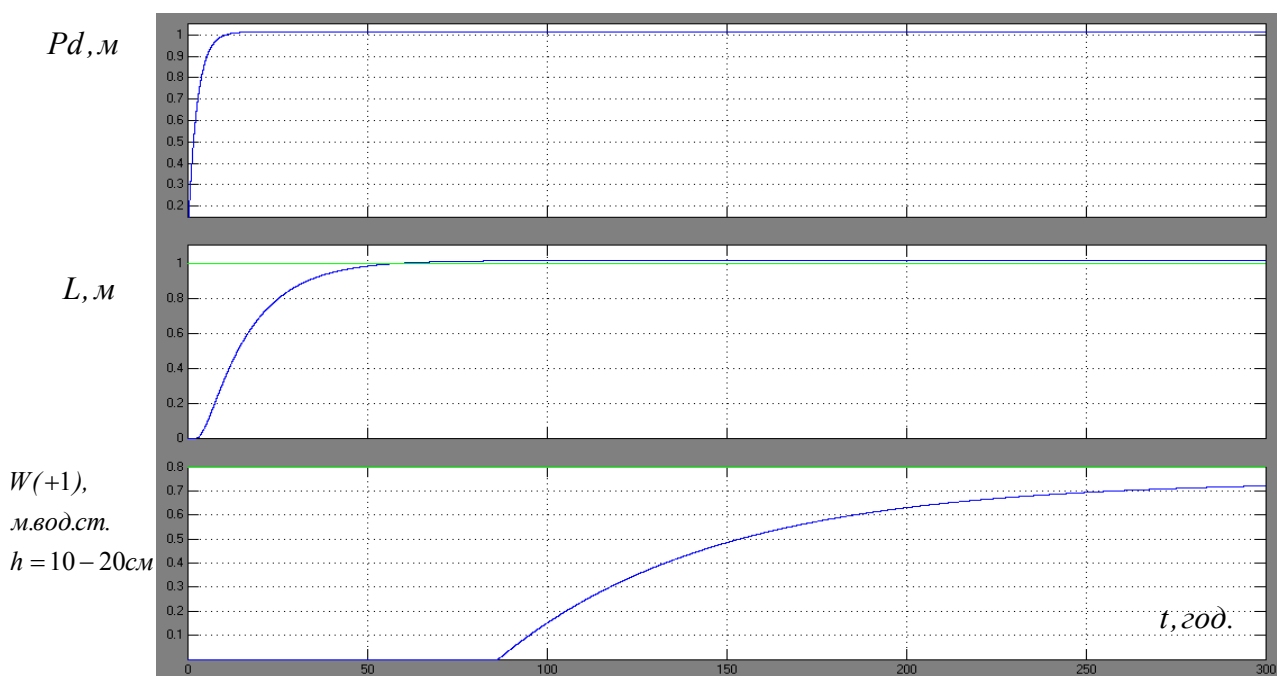


Рисунок 3.25 – Перехідні характеристики зміни гідравлічного напору в колекторно-дренажній системі, РГВ у міждренні та всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=10-20$ см

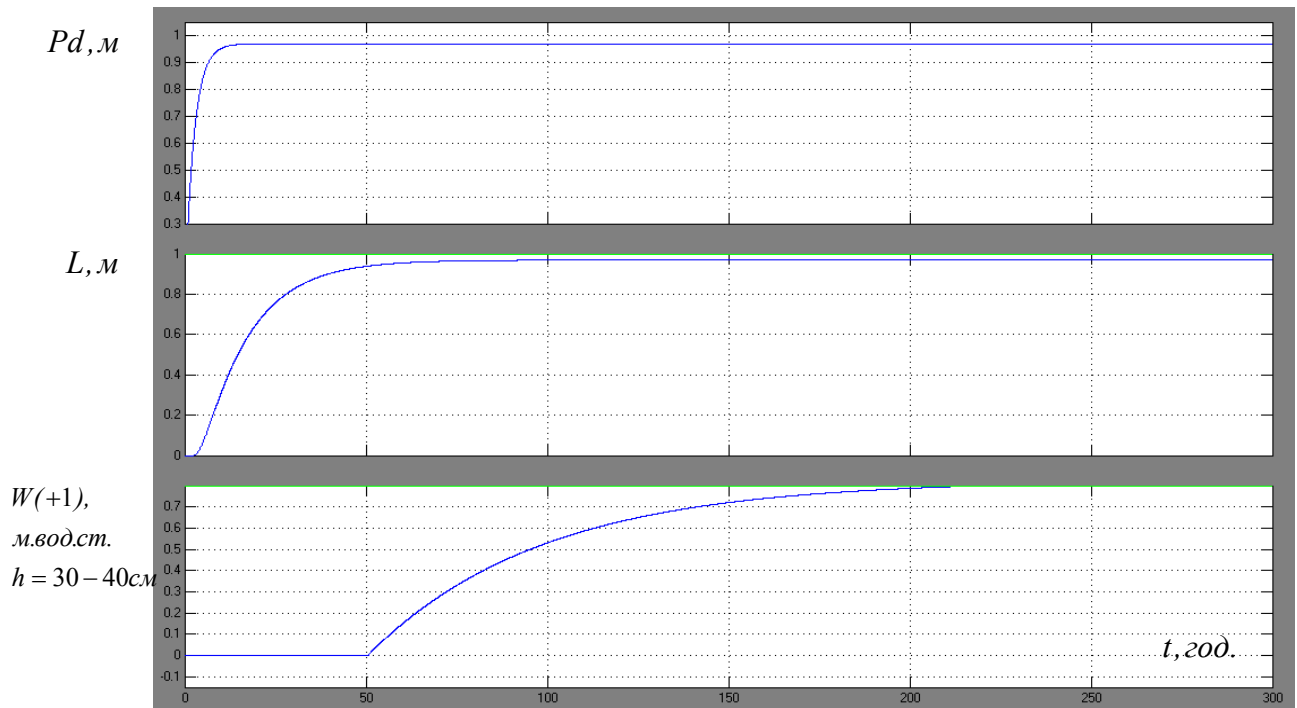


Рисунок 3.26 – Перехідні характеристики зміни гідравлічного напору в колекторно-дренажній системі, РГВ у міждренні та всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=30-40$ см

Параметри якості перехідного процесу у шарі ґрунту 30-40 см: час регулювання $t_{рег.} = 200(год.) = 8.33(доби)$, запізнення $\tau = 50.5(год.) \approx 2.1(доби)$, перерегулювання $\sigma = 0\%$, коливальність $n=0$, усталена похибка $\delta_{уст.} = \frac{0.8193 - 0.8}{0.8} \cdot 100 \approx 2.4\%$.

3.3 Оптимізація енергетичних затрат і витрат води в автоматизованій системі керування вологозабезпеченістю з врахуванням очікуваної врожайності сільськогосподарських культур

Метою керування водно-повітряним режимом ґрунту є отримання планового врожаю сільськогосподарських культур. Сучасні методи розрахунку осушувальних систем та управління ними вимагають використання кількісних зв'язків між водним режимом ґрунту та врожайністю культур. Існують підходи по зв'язуванні врожайності із сумарним випаровуванням, коефіцієнтом

вологозабезпеченості, опадами, кількістю днів, в які рослини відчують водний стрес. Найдосконалішими є динамічні моделі формування врожаю, в яких враховуються всі основні чинники життєдіяльності рослин. Вони інваріантні, але для їх практичного застосування необхідно визначати велику кількість недостатньо вивчених на даний час чинників зовнішнього середовища та фізіології рослин, що змінюються у часі за видами та сортами рослин [20].

Для практичних цілей для кількісної оцінки врожаю вченими Інституту гідротехніки і меліорації (м. Київ), зокрема Ковальчуком П.І. у роботі [14], запропонована наступна нелінійна модель у вигляді добутку двох функцій:

$$y = F(W_1 \dots W_n) \cdot y^p(\theta_1 \dots \theta_n), \quad (3.3)$$

де $F(W_1 \dots W_n)$ - функція залежності врожаю від динаміки вологості ґрунту за фазами розвитку сільськогосподарської культури;

$y^p(\theta_1 \dots \theta_n)$ - плановий врожай сільськогосподарської культури у разі оптимального водоспоживання, залежний від рівня елементів живлення $\theta_1 \dots \theta_n$.

За фізіологічними властивостями розрізняють два типи культур. До першого типу належать культури, що мають яскраво виражені критичні періоди, наприклад, зернові, для яких недостатнє водопостачання під час цвітіння має необоротний згубний вплив на обсяг врожаю; до другого – культури, наприклад, трави, які можуть переносити підсушування ґрунту протягом невеликого періоду і після цього цілком відновлювати врожай за оптимального водоспоживання. В таких моделях кожна попередня фаза розвитку рослин впливає на зростання і розвиток у наступній фазі [14].

Фізіологічні обмеження виражені тим, що для культур першого типу рівняння має вигляд добутку функцій окремих періодів:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) \cdot f_2(W_2) \cdot \dots \cdot f_n(W_n), \quad (3.4)$$

для другого типу – суми функцій окремих періодів:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) + f_2(W_2) + \dots + f_n(W_n), \quad (3.5)$$

де $f_i(W_i)$ - функція, яка відповідає питомому (відносно одиниці) зниженню врожаю при зниженні відносно критичного значення W_i^{cr} вологості ґрунту W_i .

Для важких ґрунтів $W_i^{cr} = 80\%$ НВ. Для інших типів ґрунтів необхідно замість фактичної вологості W_i підставляти вираз $W_i + d_i$, де $d_i = W_{cr.h.}^i - W_{cr}^i$ - поправковий коефіцієнт i -ї фази розвитку, $W_{cr.h.}^i$, W_{cr}^i - відповідно критична вологість важких ґрунтів і ґрунтів розглядуваного в моделі типу.

Для моделей другого типу (таких як люцерна, трави) зниження врожаю внаслідок недополиву у попередній фазі (періоді) не впливає на врожайність у наступній фазі розвитку сільськогосподарських рослин, що зумовлено їхньою структурою.

Динаміку формування врожаю на основі рівняння (3.4) можна подати у вигляді системи рівнянь блокового типу:

$$y_i^p = f_i(W_i) \cdot y_{i-1}^p(\theta), \quad i \in [1; n], \quad (3.6)$$

в якій вплив дефіциту вологості у кожній $(i-1)$ -й фазі поширюється на i -ту фазу через $y_{i-1}^p(\theta)$. Очевидно, що

$$y_0^p(\theta) \geq y_1^p(\theta) \geq y_2^p(\theta) \geq \dots \geq y_n^p(\theta),$$

причому рівність $y_i^p(\theta) = y_{i-1}^p(\theta)$ досягається у тому разі, якщо протягом i -ї фази вологість ґрунту не знижувалася аж за критичну межу W_i^{cr} , тобто $f_i(W_i) = 1$.

Модель врожайності багаторічних трав. Математичну модель «відносна врожайність – динаміка вологості ґрунту» для багаторічних трав представимо у вигляді [20]:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) \cdot f_2(W_2) \cdot f_3(W_3) \cdot f_4(W_4), \quad (3.7)$$

$$f_i(W_i) = 0.01 \cdot (A_i W_i^3 + B_i W_i^2 + C_i W_i + D_i), \quad (3.8)$$

де W_i - середня вологість кореневмісного шару ґрунту у фазу i , в % від ПВ;

A_i, B_i, C_i, D_i - емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Значення емпіричних коефіцієнтів у рівнянні (3.8)

| Культура | Міжфазний період | Коефіцієнти | | | |
|-------------------|-------------------|----------------------|--------|-------|----------|
| | | A | B | C | D |
| Багаторічні трави | Пісок | | | | |
| | 1 | $1.27 \cdot 10^{-3}$ | -0.307 | 23.29 | -460.43 |
| | 2 | $2.05 \cdot 10^{-3}$ | -0.485 | 36.50 | -786.07 |
| | 3 | $2.06 \cdot 10^{-3}$ | -0.511 | 40.53 | -941.10 |
| | 4 | $1.38 \cdot 10^{-3}$ | -0.306 | 21.78 | -400.55 |
| Багаторічні трави | Супісь | | | | |
| | 1 | $1.27 \cdot 10^{-3}$ | -0.337 | 28.43 | -666.87 |
| | 2 | $2.05 \cdot 10^{-3}$ | -0.540 | 45.72 | -1155.35 |
| | 3 | $2.07 \cdot 10^{-3}$ | -0.55 | 49.07 | -1298.65 |
| | 4 | $1.38 \cdot 10^{-3}$ | -0.339 | 26.94 | -595.17 |
| Багаторічні трави | Суглинок середній | | | | |
| | 1 | $1.27 \cdot 10^{-3}$ | -0.348 | 30.49 | -755.27 |
| | 2 | $2.06 \cdot 10^{-3}$ | -0.554 | 47.98 | -1250.39 |
| | 3 | $2.06 \cdot 10^{-3}$ | -0.573 | 51.39 | -1400.29 |
| | 4 | $1.38 \cdot 10^{-3}$ | -0.347 | 28.29 | -650.01 |
| Багаторічні трави | Горф | | | | |
| | 1 | $1.27 \cdot 10^{-3}$ | -0.348 | 29.78 | -724.95 |
| | 2 | $2.05 \cdot 10^{-3}$ | -0.554 | 49.03 | -1297.65 |
| | 3 | $2.06 \cdot 10^{-3}$ | -0.573 | 52.54 | -1452.11 |
| | 4 | $1.38 \cdot 10^{-3}$ | -0.347 | 29.06 | -658.94 |

Для економії водних та енергетичних ресурсів при прийнятті кінцевого рішення про значення РГВ пропонується враховувати витрати на зміну РГВ та значення очікуваної врожайності. При цьому шукане значення РГВ буде належати відрізку $L_i \in [L_{curr}; L_{task}]$, де L_{curr} - поточне значення РГВ, L_{task} - завдання, розраховане нео-фаззі регулятором:

$$L_{task,k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h).$$

Розіб'ємо відрізок $[L_{curr}; L_{task}]$ на рівні частини. Для кожного значення РГВ визначимо вологість ґрунту, витрати на зміну РГВ до даного значення та відносну врожайність. Всмоктуючий тиск ґрунту визначатиметься за навченою нео-фаззі моделлю об'єкта керування:

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h).$$

Для переведення значення всмоктуючого тиску у відносну вологість скористаємося основною гідрофізичною характеристикою для даного типу ґрунту. Відносну врожайність на кожній фазі розвитку рослин визначатимемо за моделями 3.4 або 3.5, а у випадку багаторічних трав – за моделлю (3.8) з емпіричними коефіцієнтами з таблиці 3.9. В результаті отримаємо множину можливих рішень визначення необхідного РГВ (таблиця 3.10).

Таблиця 3.10 – Множина можливих рішень визначення необхідного РГВ

| Рішення $x_i \in X$ | РГВ $L_i \in [L_{curr}; L_{task}]$ | Вологість (всмоктуючий тиск) ґрунту W_i | Витрати на зміну РГВ, $k_{1,i}$ | Відносна врожайність на i -й фазі $k_{2,i} = f_i(W_i)$ |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| x_0 | L_0 | W_0 | $k_{1,0}$ | $k_{2,0}$ |
| x_1 | L_1 | W_1 | $k_{1,1}$ | $k_{2,1}$ |
| x_2 | L_2 | W_2 | $k_{1,2}$ | $k_{2,2}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| x_n | L_n | W_n | $k_{1,n}$ | $k_{2,n}$ |

Область допустимих рішень: $X = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$. Кожне рішення характеризується двома критеріями - витрати на зміну РГВ та відносна врожайність – $K = \{k_1, k_2\}$. Застосувавши один з методів підтримки прийняття рішення в умовах багатокритеріальності (принцип головного критерію, функціонально-вартісний аналіз, принцип послідовної оптимізації, схема максимальної загальної корисності, схема максиміну), визначаємо, який РГВ необхідно встановити на ОЗС, з врахуванням фінансових витрат та очікуваної врожайності [6; 107]. Наприклад, при застосуванні принципу головного критерію, визначаємо, який критерій є головним. Другий критерій виступає у ролі обмеження. Так, якщо головним критерієм є витрати на зміну РГВ, то відносна врожайність виступає у ролі обмеження:

$$k_{2,min} \leq k_2 \leq 1.$$

Формуємо область допустимих рішень X^* , яка задовольняє заданим обмеженням. Тоді найкращим рішенням є:

$$x = \arg \min_{x \in X^*} k_1.$$

Даний підхід дозволяє економити водні та енергетичні ресурси при керуванні вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур без втрат врожайності.

3.4 Розробка методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки

Використання систем крапельного зрошення. Системи крапельного зрошення широко використовуються для вирощування різноманітних сільськогосподарських культур як у теплицях, так і на відкритих ділянках

різного розміру, від невеликих приватних садових ділянок до фермерських господарств. Особливість даного типу зрошення у тому, що вода повільно подається краплями або струменями у заданий час і у заданій кількості безпосередньо до коренів кожної рослини. При цьому витрата води зменшується на 20-50% у порівнянні з поверхневим поливом і дощуванням, попереджається надлишковий полив і внаслідок цього підняття рівня ґрунтових вод та засолення ґрунту, не ущільнюється верхня частина ґрунту, знижується рівень розростання бур'яну. При проведенні зрошення необхідно враховувати вплив випадково змінних погодних факторів і щоденно корегувати поливну норму.

Структура автоматизованої системи керування вологістю ґрунту за допомогою крапельного зрошення. Структурну схему автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю модульної ділянки за допомогою крапельного зрошення наведено на рис. 3.27, де W_z - задана вологість ґрунту, W - реальна вологість ґрунту, $E_w = W_z - W$ - розузгодження, C_d - регулятор частки недополиву рослин, d - частка недополиву рослин, C_w - регулятор всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту, U_c - керуючий сигнал, АМ – виконавчий механізм, RB – регулюючий орган, Об'єкт керування – модульна ділянка ґрунту, LE1 – давач появи дощу, ME1 – давач всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту, ME2 – давач вологості повітря, TE – давач температури повітря, LE2 – давач опадів, RE – давач освітленості, SE – давач швидкості вітру.

Дана схема являє собою комбіновану систему керування з регулятором, який складається з двох послідовно з'єднаних ланок. Перша ланка визначає допустиму частку недополиву рослин у відсотках, враховуючи дані метеопрогнозу на наступний день. Очевидно, що допустима частка недополиву буде тим більша, чим більше значення прогнозованих опадів.

Друга ланка обраховує завдання всмоктуючого тиску (вологості) на поточний день, враховуючи рекомендації першого регулятора, і подає керуючі впливи на виконавчі механізми. При цьому повинна виконуватися нерівність:

$$W > W_{wilting} + \delta_1, \quad (3.9)$$

де W - вологість ґрунту,

$W_{wilting}$ - вологість зав'ядання рослин,

δ_1 - гістерезис (певний резерв).

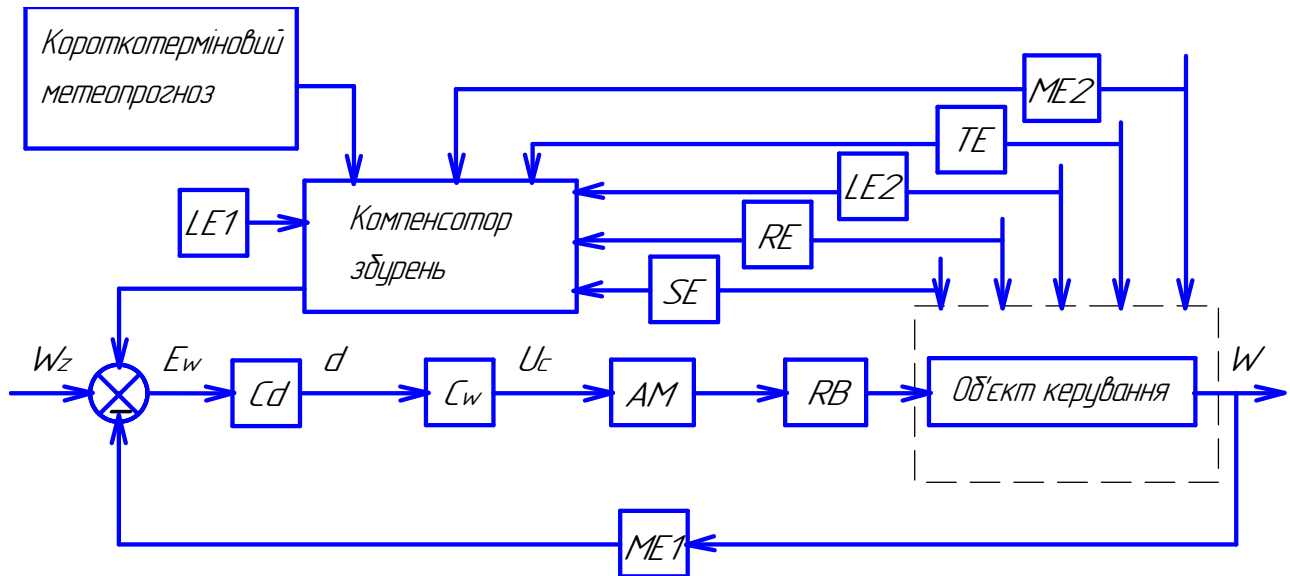


Рисунок 3.27 – Структура АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з крапельним зволоженням

Тобто, вологість ґрунту повинна триматися в межах:

$$W \in [W_{wilting} + \delta_1; W_z]. \quad (3.10)$$

Допустима частка недополиву при цьому становить:

$$\delta \in [0; W_z - (W_{wilting} + \delta_1)]. \quad (3.11)$$

Оскільки величина заданої вологості W_z залежить від виду рослини і фази її розвитку, тобто змінюється в часі, то зручніше спочатку визначати величину недополиву у відсотках ($x, \%$), а потім переводити в абсолютні одиниці за залежністю (3.12).

$$\delta = \frac{x \cdot (W_z - W_{wilting} - \delta_1)}{100}, \text{ мм.} \quad (3.12)$$

Вираз (3.12) є однаковим для всіх видів рослин і фаз їх розвитку. Змінюватиметься лише значення W_z .

Розробка методу керування вологістю ґрунту за допомогою крапельного зрошення на основі нечіткої логіки. Для визначення частки недополиву $x, \%$ пропонується використати алгоритми нечіткої логіки. В якості вхідної змінної використовуються дані метеопрогнозу по опадах на наступний день. Вихідною змінною є допустима частка недополиву рослин на поточний день. У якості терм-множини вхідної лінгвістичної змінної будемо використовувати множину

$$T_1 = \{ \text{„дуже мала кількість опадів”, „невеликі опади”, „помірні”, „сильні”, „дуже сильні”} \}, \quad (3.13)$$

або у символічному вигляді

$$T_1 = \{ NB, NS, Z, PS, PB \} \quad (3.14)$$

з функціями належності, зображеними на рис. 3.28.

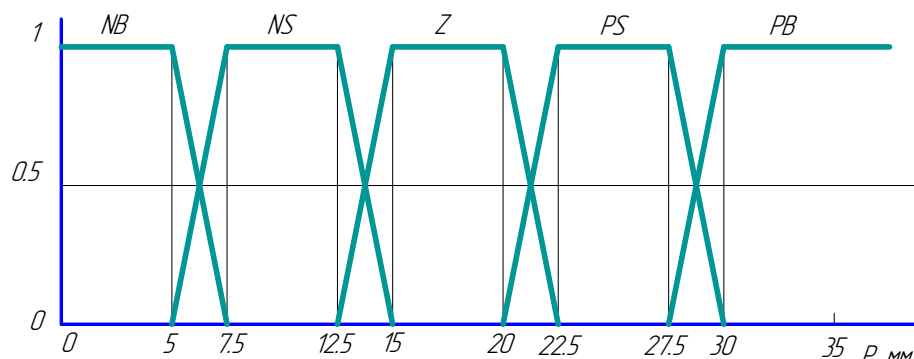


Рисунок 3.28 – Функції належності змінної «прогнозована кількість опадів»

У якості терм-множини вихідної лінгвістичної змінної (величина недополиву у %) будемо використовувати множину

$$T_2 = \{ \text{„дуже мала”, „невелика”, „середня”, „велика”, „дуже велика”} \}, \quad (3.15)$$

або у символічному вигляді

$$T_2 = \{ NB, NS, Z, PS, PB \} \quad (3.16)$$

з функціями належності, зображеними на рис. 3.29.

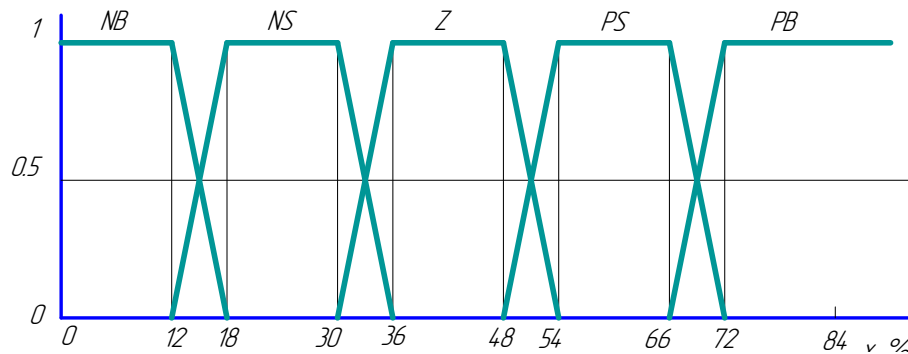


Рисунок 3.29 – Функції належності змінної «частка недополиву»

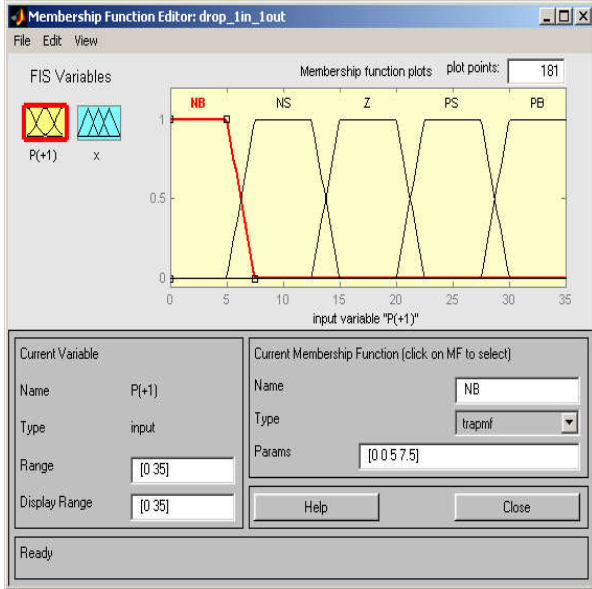
База нечітких лінгвістичних правил для визначення допустимої частки недополиву рослин наведено у таблиці 3.11. Тобто, чим сильніші прогноуються опади, тим на більшу величину δ можна недополити рослини. Крім опадів, на об'єкт керування (ділянку ґрунту) впливають наступні збурення: сонячна радіація, вітер, температура повітря, відносна вологість повітря. Впливаючи на випаровування з поверхні рослин та ґрунту, приведені збурення впливають на водоспоживання, а, отже, і на результуючу вологість ґрунту. Дані параметри не входять безпосередньо у базу нечітких лінгвістичних правил, але враховуються системою керування. Так, наприклад, ми недополили рослини у день k на величину PS , розраховуючи на сильні опади у день $(k + 1)$. Насправді величина опадів потрапила у діапазон Z , був помірний вітер і висока температура повітря. В результаті $W_{k+1} \neq W_{z,k+1}$. Враховуючи прогноз по опадах на день $(k + 2)$, буде здійснено полив, який компенсує збурення по температурі, сонячній радіації, нестачі опадів та інших збурень у день $(k + 1)$.

Таблиця 3.11 – База нечітких лінгвістичних правил для визначення частки недополиву рослин при крапельному зрошенні

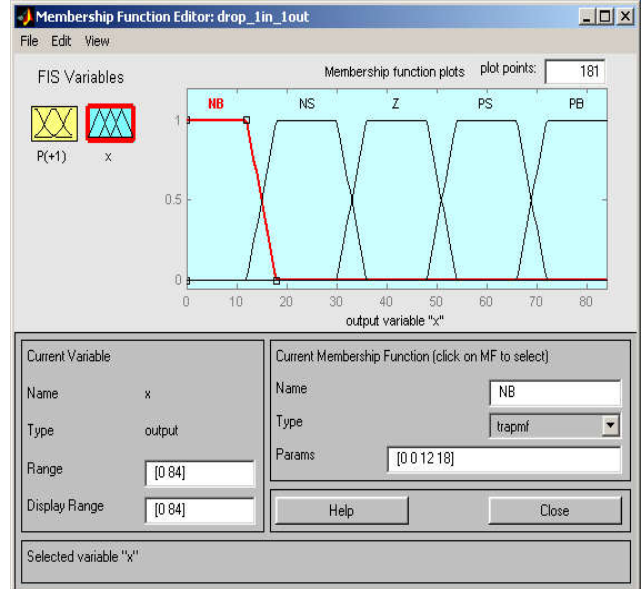
| Прогнозована кількість опадів P, мм | Частка недополиву рослин x, % |
|----------------------------------------|----------------------------------|
| NB | NB |
| NS | NS |
| Z | Z |
| PS | PS |
| PB | PB |

Для синтезу системи нечіткого виведення використано редактор Fuzzy Logic Toolbox системи Matlab (рис. 3.30-3.32). Розрахунок завдання для АСК вологістю ґрунту при крапельному зрошенні здійснюється щодобово. При появі дощу полив необхідно зупинити (керуючий сигнал $U_c = 0$), а після його закінчення знову здійснити перерахунок завдання. Полив потрібно здійснювати водою певної температури, тому у структурі системи зрошення передбачена накопичувальна ємність, де вода буде нагріватися під дією сонячної радіації. З метою мінімізації експлуатаційних витрат ємність наповнюється водою у періоди доби, коли електроенергія найдешевша. Схема роботи АСК вологості ґрунту наведена на рис. 3.33.

Запропонована АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зрошенні дозволяє підвищити точність керування вологістю завдяки оперативному врахуванню змінних збурень на об'єкт і забезпечити отримання планової врожайності при раціональному використанні енергетичних і водних ресурсів.



а)



б)

Рисунок 3.30 – Редактор функцій належності змінних: а – прогнозованої кількості опадів P, мм, б – частки недополиву рослин x, %.

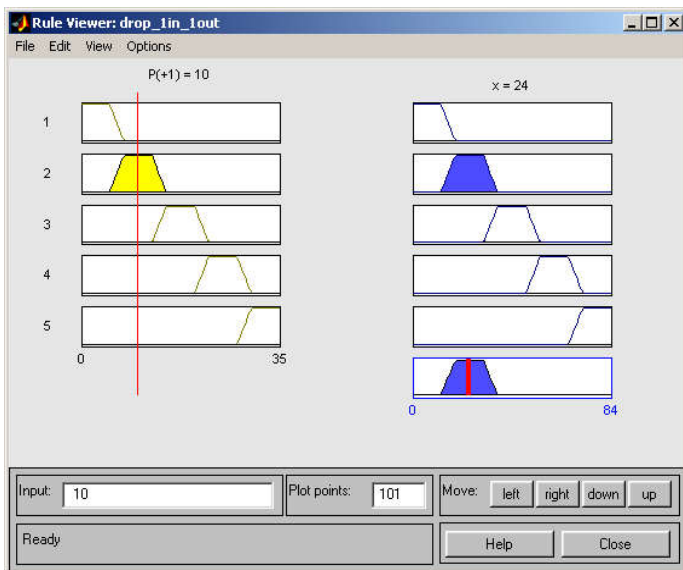


Рисунок 3.31 – Вікно перегляду правил (The Rule Viewer)

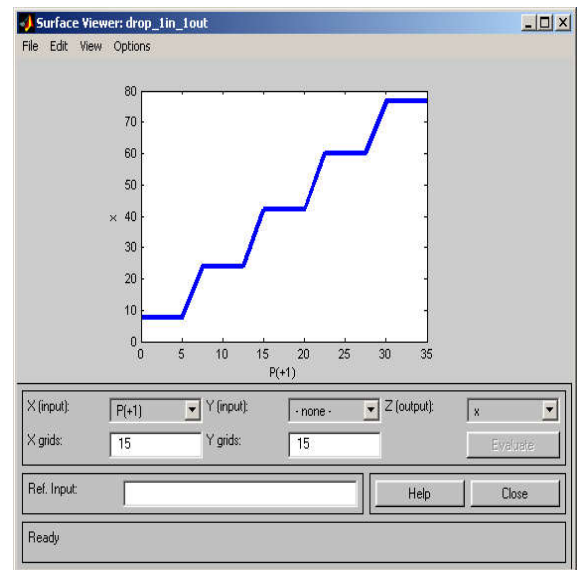


Рисунок 3.32 – Вікно перегляду поверхні (The Surface Viewer)

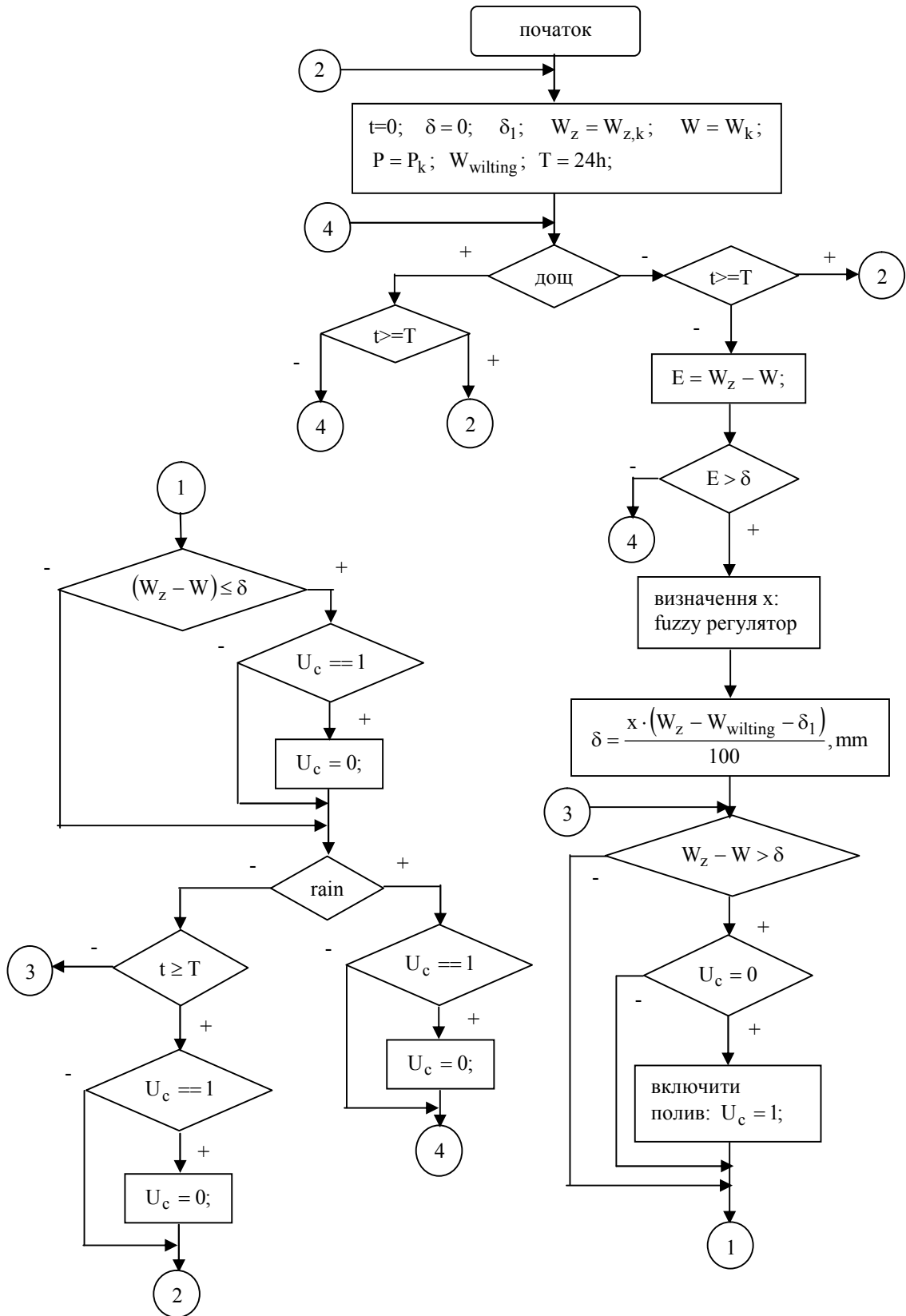


Рисунок 3.33 – Схема роботи АСК вологістю ґрунту у межах модульної ділянки за допомогою крапельного зрошення

3.5 Основні результати і висновки до розділу

1. У даному розділі розроблено нові методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі статичних багатoshарових штучних нейронних мереж прямого розповсюдження різної архітектури та нео-фаззі мереж, виконано їх порівняльний аналіз.

2. Проведено моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, досліджено її динамічні властивості.

3. Вперше застосовано інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, що дозволило економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю.

4. Розроблено новий метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки з врахуванням впливу випадкових збурень на об'єкт.

5. Розроблені методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур дозволяють підвищити точність керування вологістю ґрунту при підґрунтовому та крапельному зволоженні шляхом оперативного врахування впливу збурень. У свою чергу, підвищення точності керування режимами зволоження дозволяє забезпечити планову врожайність сільськогосподарських культур при більш раціональному використанні енергетичних та водних ресурсів.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА І ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ ПІДГРУНТОВОМУ ЗВОЛОЖЕННІ

4.1 Розробка апаратної частини автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю

4.1.1 Гідравлічний регулятор для керування рівнем ґрунтових вод

Як було показано у розділі 1, існуючі гідрорегулятори (рис. 1.3-1.5) мають ряд недоліків, тому нами запропоновано удосконалену конструкцію гідравлічного регулятора двосторонньої (рис. 4.1), де 1 – регулюючий колодезь; 2 – колектор; 3 – запірний орган; 4 – давач рівня води; 5 – труба; 6, 7 – електромагнітні клапани; 8 – фільтр; 9, 10 – еластичні клиновидні камери; 11, 12 – електромагнітні клапани; 13, 14 – ежектори; 15, 16 – електромагнітні клапани; 17 – електромагнітний клапан для зв'язку з атмосферою; 18 – мікропроцесорний регулятор; 19 – давач кількості опадів; 20 – давач температури повітря; 21 – давач вологості повітря; 22 – давач швидкості вітру. В залежності від виду вирощуваних на керованому меліоративному модулі сільськогосподарських культур, схеми зволоження, часу вегетації та погодних умов гідравлічний регулятор може працювати в різних режимах [67]. Регулювання рівня ґрунтових вод на модулі може здійснюватись або шляхом затримки дренажного стоку в початкові періоди вегетації чи в післядощові періоди, або шляхом подачі води на зволоження з каналу через колектор 2. Мікропроцесорний регулятор 18 підтримує заданий РГВ шляхом керування станом запірнього органу 3.

В режимі затримки дренажного стоку мікропроцесорний регулятор відкриває електромагнітний клапан (ЕК) ЕК7 і закриває ЕК6. Якщо рівень в трубі 5 за показами датчика 4 нижчий заданого, то мікропроцесорний регулятор

закриває EK11 та EK12 і відкриває EK15, EK16 і EK17. При цьому вода з колодязя через EK15 і EK16 надходить в камери 9 і 10, внаслідок чого запірний орган перекриває отвір колектора і проходить затримка дренажного стоку. Якщо рівень в трубі 5 вищий заданого, то мікропроцесорний регулятор закриває EK15 і EK16 та відкриває EK11, EK12, EK17. Вода через EK11 і EK12 починає зливатись з камер 9 і 10. При витіканні води з камери 10 виникає різниця зовнішнього тиску води в колодязі та внутрішнього в камері 10, що створює зусилля, яке починає відкривати запірний орган. При проходженні води з колодязя через колектор 2 в трубках 13 і 14 виникає ефект ежекції, що прискорює злив води з камер 9 і 10, зменшуючи інерційність відкриття запірного органу.

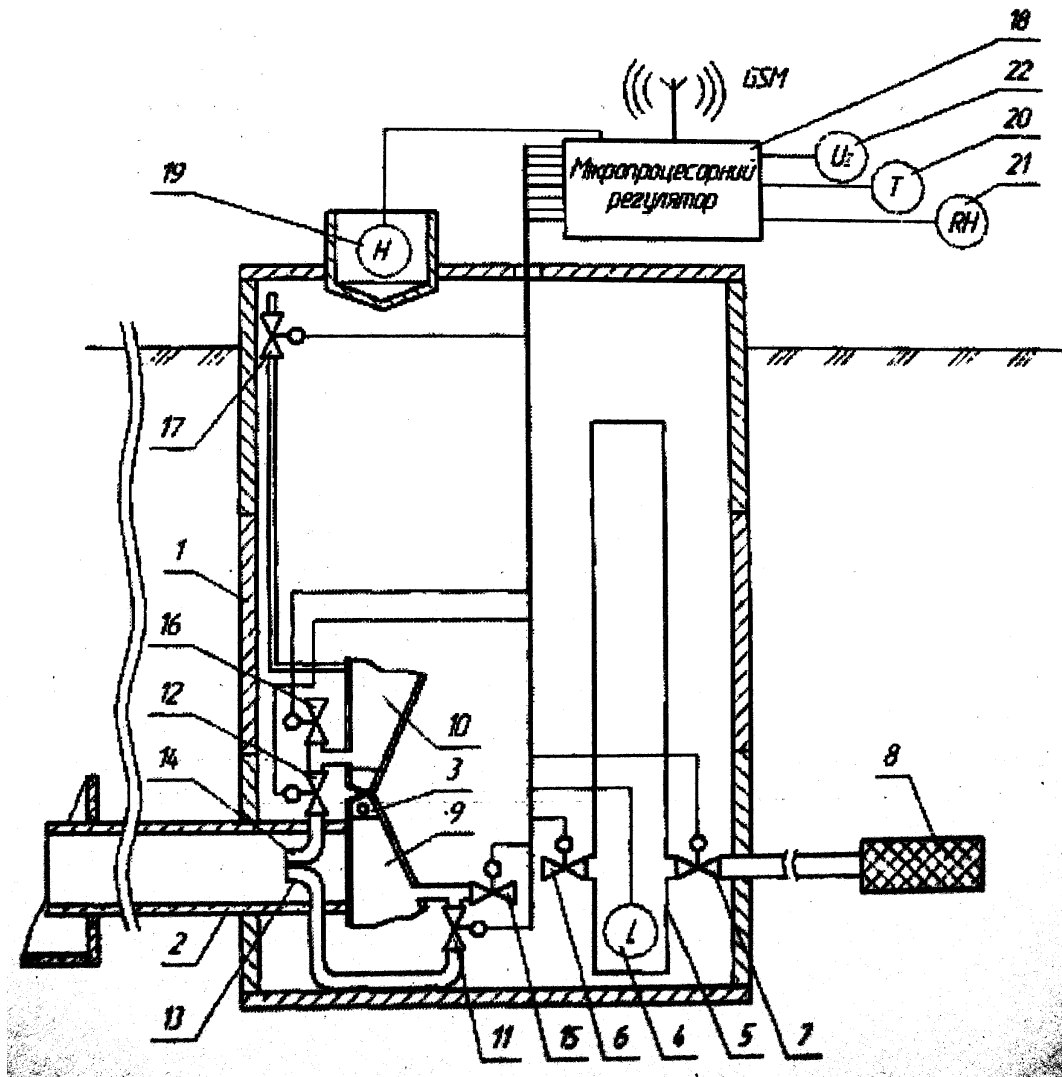


Рисунок 4.1 – Удосконалена конструкція гідравлічного регулятора двосторонньої дії

Через заданий час, який визначається об'ємом камери 10, мікропроцесорний регулятор закриває ЕК17 і в обох камерах за рахунок ежекції підтримується розрідження, що забезпечує надійне відкриття запірнього органу в цьому режимі. При роботі регулятора в режимі водоподачі від каналу мікропроцесорний регулятор закриває ЕК7, відкриває ЕК6, забезпечуючи регулювання рівня в колодязі за показами датчика рівня 4. В процесі регулювання рівня, якщо його значення нижче заданого, то мікропроцесорний регулятор відкриває ЕК15, ЕК16, ЕК17 та закриває ЕК11 і ЕК12. При цьому запірний орган відкритий. Якщо рівень в колодязі вище заданого, то мікропроцесорний регулятор відкриває ЕК11, ЕК17 та закриває ЕК12, ЕК15, ЕК16, закриваючи тим самим запірний орган.

4.1.2 Розробка апаратної частини автоматизованої системи керування

Структуру АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з підґрунтовим зволоженням наведено на рис. 4.2, де Сws – регулятор водоподачі; Сdf – регулятор дренажного стоку; ВС – вимірювальна станція; АРМ – автоматизоване робоче місце оператора; МЕ-1-1 – давач всмоктуючого тиску ґрунту, LE-2-1 – давач рівня води у керуючому колодязі, ТЕ-3-1 – давач температури повітря, МЕ-4-1 – давач відносної вологості повітря, LE-5-1 – давач опадів. Технічно АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур пропонується реалізувати на таких структурних одиницях:

1 – гідравлічний регулятор (рис. 4.1), оснащений мікропроцесорним блоком керування на основі двох мікроконтролерів фірми Microchip - PIC18F4620 (рис. 4.3) і PIC16F690 - для вимірювання всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту, рівня води у керуючому колодязі, обміну даними з вимірювальною станцією за допомогою радіозв'язку на основі модуля Radiocrafts по протоколу RC-232, подачі керуючих сигналів на виконавчий механізм для зміни рівня води у керуючому колодязі і, відповідно, РГВ;

2 – вимірювальна станція (BC), оснащена мікропроцесорним блоком на основі двох мікроконтролерів PIC16F690 для вимірювання метеопараметрів (температури та відносної вологості повітря, кількості опадів), обміну даними з автоматизованим робочим місцем (АРМ) диспетчера за допомогою GSM модема SIM300С та мікропроцесорними блоками гідравлічних регуляторів за допомогою радіомодема по протоколу RC-102;

3 – АРМ диспетчера ОЗС на базі ПК, який виконує функції обрахунку завдання РГВ, який необхідно тримати протягом певного періоду, обміну даними з вимірювальною станцією за допомогою GSM зв'язку, зчитування даних короткотермінового метеопрогнозу з Internet сайту, ведення загальної бази даних технологічних параметрів, візуалізації процесу і зв'язку з диспетчером;

4 – переносний пульт керування оператора з можливістю ручної зміни сигналу завдання та індикацією усіх необхідних для контролю і наладки параметрів:

- на базі семисегментних індикаторів і двох інтегральних мікросхем - дешифратора двійково-десятькового коду в код семисегментного індикатора К176ИД2, дешифратора-демультиплексора 4-х ліній на 16, К155ИД3;

- на базі LCD екрану, основою якого є рідкокристалічний індикатор Amprige AC-162 AB, та мікроконтролера PIC18F4620;

5 – блок дискретних силових виходів для керування електромагнітними клапанами гідравлічного регулятора на основі релейних елементів HLS-14F2 та транзисторних ключів;

6 – блок контролю напруги на основі мікроконтролера PIC16F690, семисегментного індикатора для введення початкових налаштувань, світлодіодних індикаторів для відображення поточного стану роботи, сонячної акумулювальної панелі із послідовним перетворювачем та стабілізатором вихідної напруги типу LM317A, високоемнісної нікель-кадмієвої акумулювальної батареї;

7 – давачі технологічних параметрів: рівня води у керуючому колодязі, всмоктуючого тиску ґрунту, вологості повітря, температури повітря, опадів.

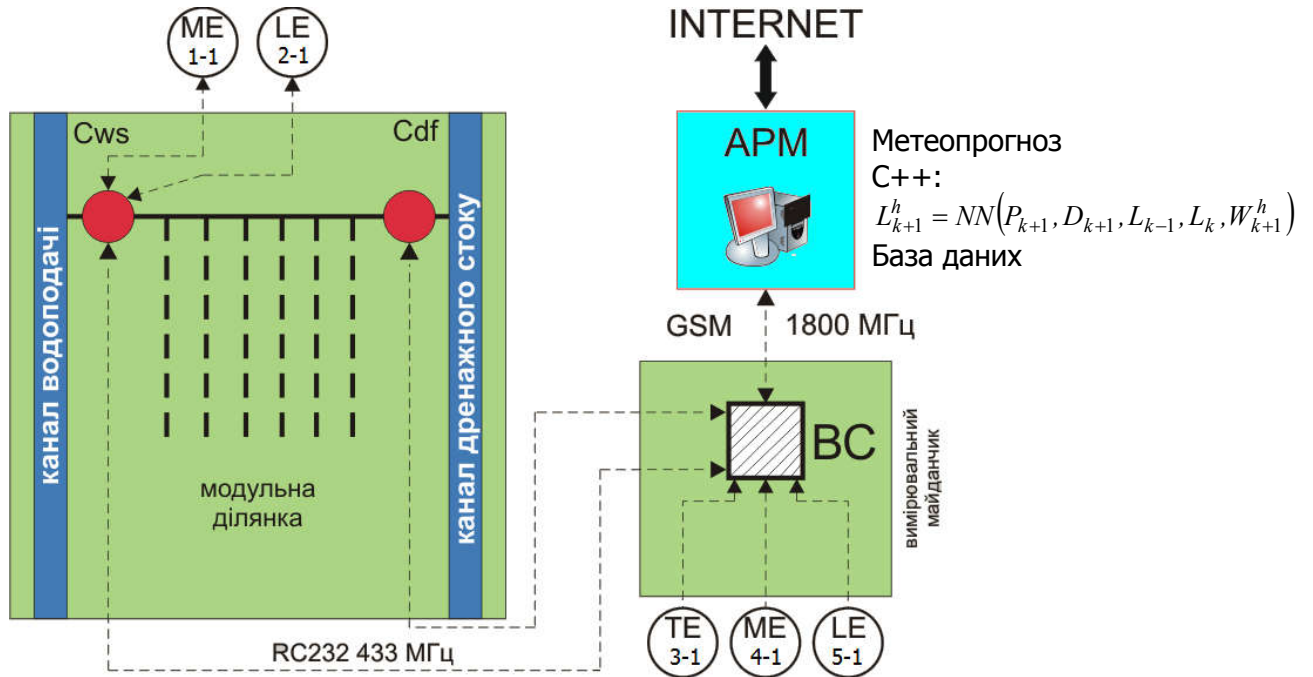


Рисунок 4.2 – Структура АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з підґрунтовим зволоженням

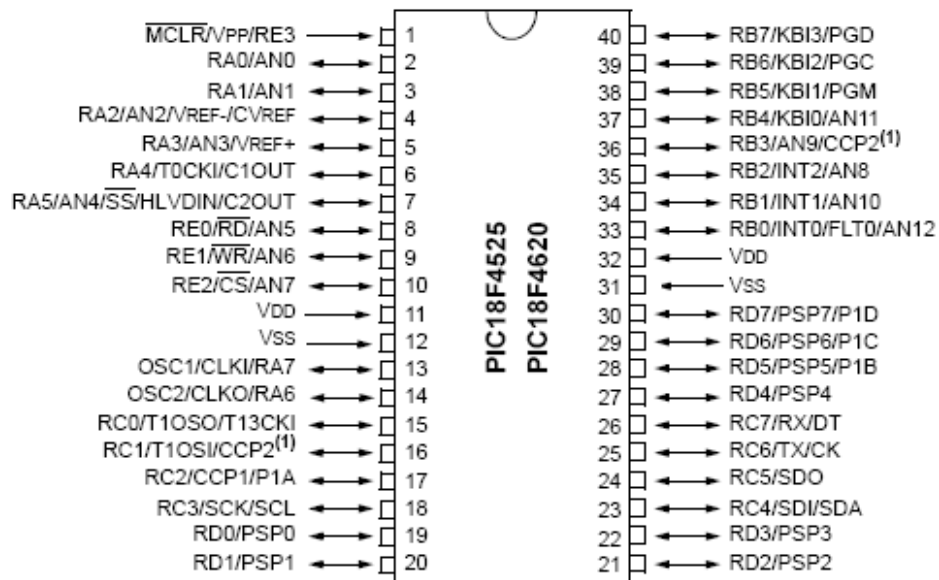


Рисунок 4.3 – Мікроконтролер PIC18F4620

Мікроконтролер PIC18F4620 являє собою 8-розрядний однокристальний мікроконтролер з частотою роботи до 40 МГц, має 13 аналогових входів, 35

дискретних входів-виходів, вбудований АЦП, модуль ШИМ, 2 таймери-лічильники, підтримку протоколів мереж I²C та SPI, модуль UART. Він повністю відповідає поставленій задачі і має в запасі додатковий резерв.

Мікропроцесорний блок гідравлічного регулятора (рис. 4.4) виконано в уніфікованому корпусі Z104 з можливістю монтажу на DIN-рейку. Основою конструкції являється «зв'язка» двох мікроконтролерів фірми Microchip – PIC18F4620 і PIC16F690. Така конструкція дозволяє зменшити енергозатрати під час експлуатації системи. У процесі роботи основний контролер PIC18F4620 знаходиться у сплячому режимі (режим “SLEEP”). У разі необхідності зміни задаючого параметра синхронізуючий контролер PIC16F690 подає «сигнал пробудження» на контролер PIC18F4620, який зчитує всі параметри, які контролюються, передає на вимірювальну станцію, приймає від диспетчерського пункту нове значення РГВ і, при необхідності, змінює логічні рівні сигналів на лініях, які контролюють стан електромагнітних клапанів. Після проведеної роботи основний контролер PIC18F4620 переводиться в режим “SLEEP”. Для збереження значень логічних рівнів на виходах мікроконтролера передбачені базові логічні елементи – тригери. Контроль за станом керуючих ліній виконує синхронізуючий контролер PIC16F690. Принципова електрична схема та технічна реалізація мікропроцесорного блоку гідрорегулятора наведені на рис. 4.5-4.6.

Основна задача по вимірюванню параметрів середовища та задання керуючого параметру покладена на потужний мікроконтролер PIC18F4620. Конструктивно передбачено 5 аналогових входів для під'єднання уніфікованих давачів та 7 дискретних виходів для під'єднання силової частини керування електромагнітними клапанами. Кожен дискретний вихід має логічний буфер, в якості якого виступають набір із J-K тригерів. Оскільки процес, яким керує даний регулятор є досить інерційним, після встановлення задаючого значення рівня ґрунтових вод та стану електромагнітних клапанів у необхідний стан, мікроконтролер PIC18F4620 переходить у сплячий режим. Логічні буфери слугують для збереження відповідного логічного рівня на керуючих лініях.

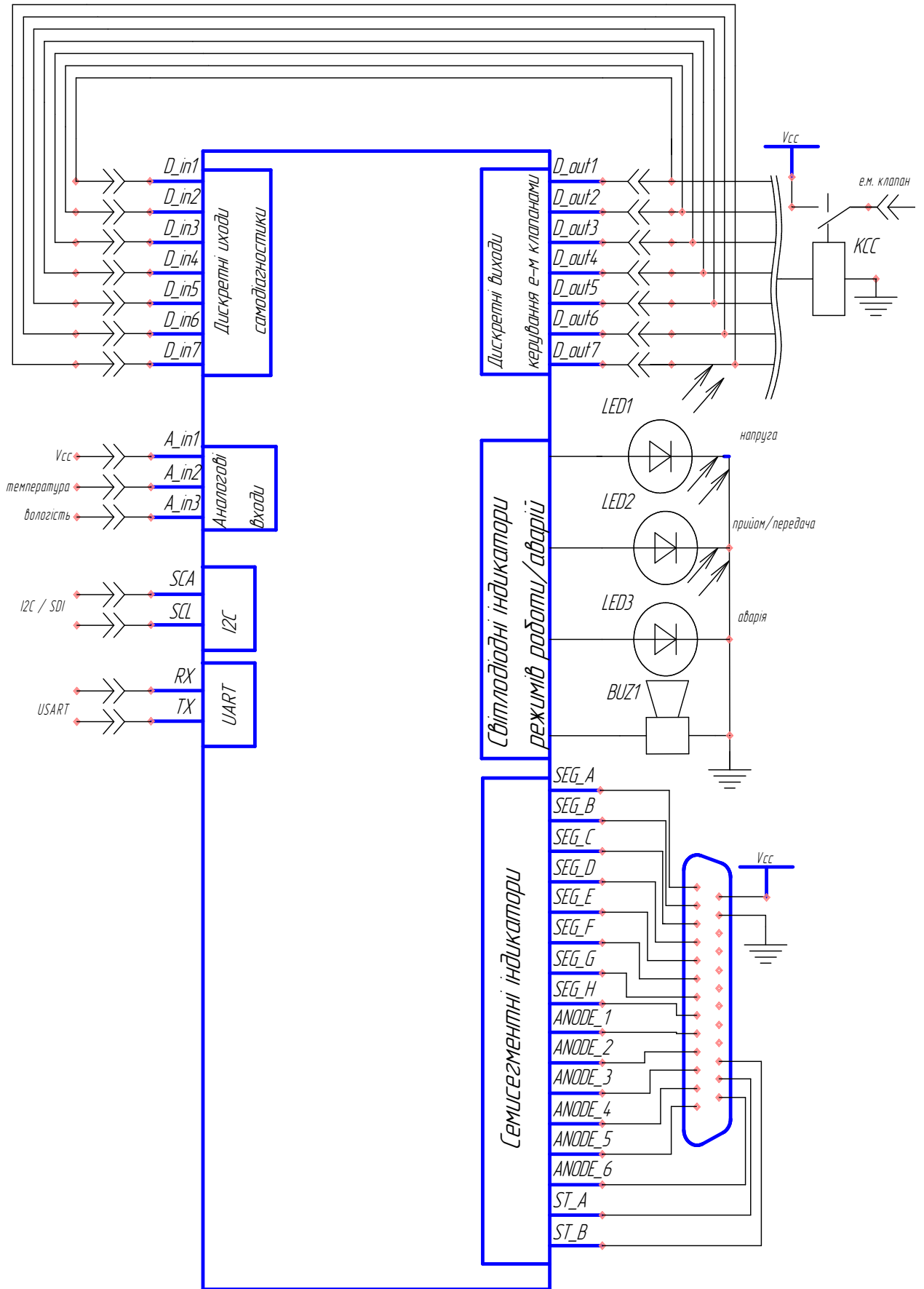


Рисунок 4.4 – Будова мікропроцесорного блоку гідрорегулятора

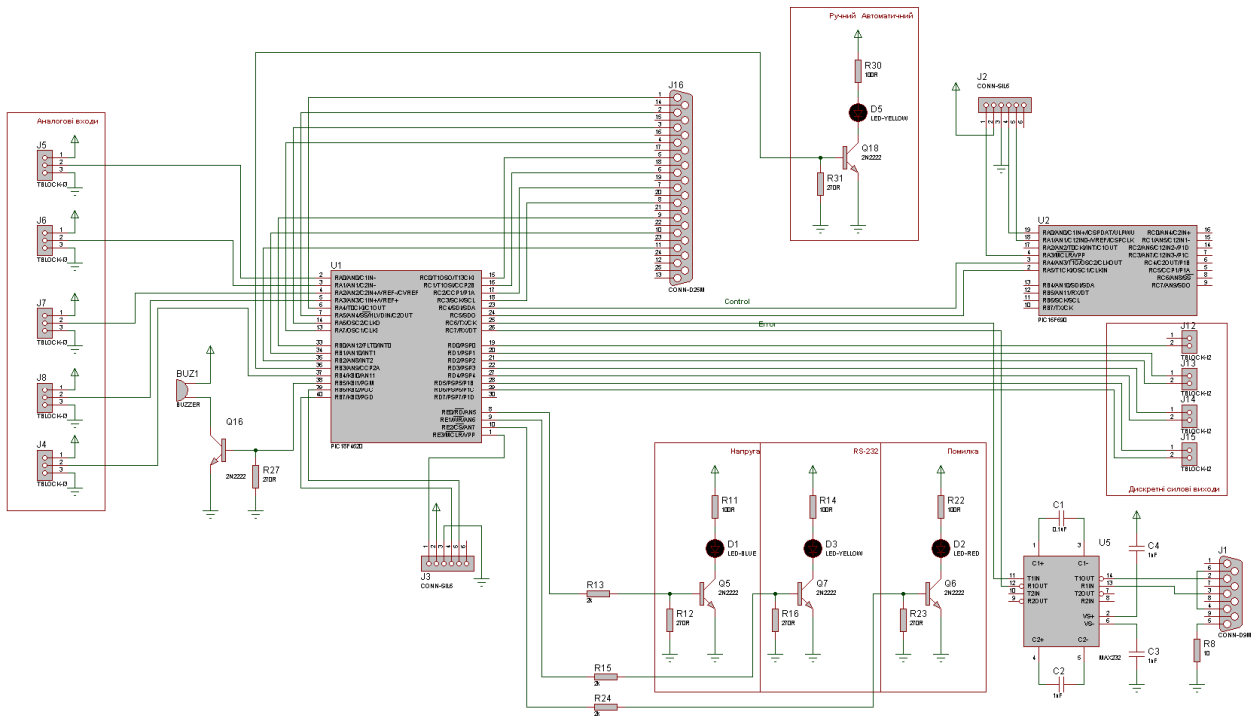


Рисунок 4.5 – Принципова електрична схема мікропроцесорного блоку гідрорегулятора

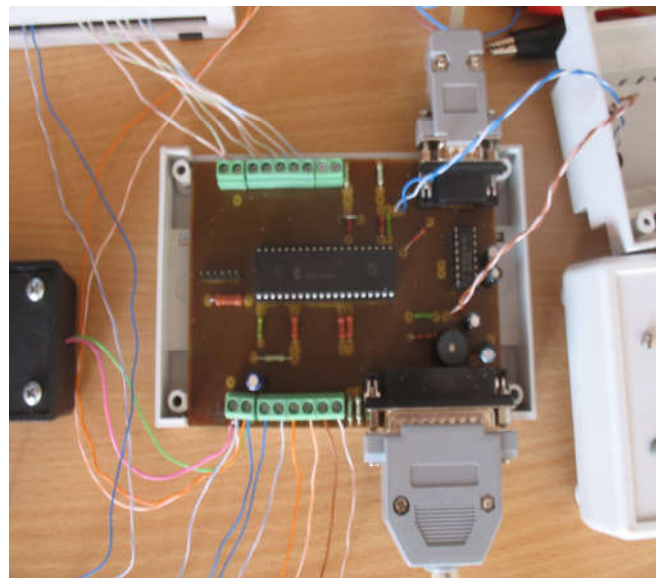


Рисунок 4.6 – Технічна реалізація мікропроцесорного блоку гідрорегулятора

Таким чином, енергоспоживання значно зменшується, оскільки основний контролер переходить у режим мінімального енергоспоживання, та з'являється можливість вести моніторинг логічного стану керуючих ліній. Якщо на будь-якій із семи ліній стався обрив або інша неполадка що призведе до

некоректного функціонування всієї системи, то в роботу вступає допоміжний мікроконтролер PIC16F690. В процесі роботи він аналізує важливі параметри роботи системи в цілому: аналіз стану ліній керування електромагнітними клапанами; індикація процесів прийому-передачі даних з іншими елементами системи; контроль за напругою живлення. Якщо при роботі він ідентифікував несправність, то відповідне повідомлення про помилку та її код буде відображатися на пульті оператора. Після входження до сплячого режиму основного контролера, логічні стани ліній запам'ятовуються в J-K тригерах і допоміжний контролер починає контролювати логічні рівні вже на виходах із J-K тригерів. Таким чином ми добиваємося самодіагностики системи із здатністю до виявлення помилок. Оскільки в алгоритмі роботи регулятора покладено періодичне вмикання основного контролера, то і енергоспоживання не збільшилось у порівнянні із алгоритмом роботи без допоміжного контролера.

Таким чином, у програмі керування закладена функція самодіагностики, при виявленні несправності відбудеться сигналізація та відображення коду помилки, що допоможе оператору швидко усунути проблему. Також передбачена діагностика стану напруги, яка подається для живлення всієї системи. Для цього виділений окремий аналоговий вхід контролера, на який подається напруга. При виході значення напруги за певні межі, також відбувається сигналізація, а при зменшенні напруги нижче критичного рівня, для запобігання виходу з ладу мікропроцесорної системи, контролер переходить в «сплячий» режим, встановлюючи тим самим електромагнітні клапани в режим «по замовчуванню».

В конструкції передбачені комунікаційні інтерфейси RS-232, для зв'язку регулятора із радіомодулем або GSM модемом. Інтерфейс RS-232 технічно виконано на основі мікросхеми MAX-232, яка перетворює логічні стани мікроконтролера +5 В та 0 В на логічні стани послідовного комунікаційного порту ± 12 В. Також передбачено роз'єм для підключення переносного пульта оператора, на якому відображаються параметри оточуючого середовища та значення параметра рівня ґрунтових вод. В режимі за замовчуванням

відбувається лише відображення параметрів, при необхідності існує режим для ручного задання параметрів.

Конструктивно мікропроцесорний блок гідрорегулятора зібраний в уніфікованому корпусі для електротехнічних пристроїв Z104K. Можливий монтаж як у спеціальних щитах, так і на відкритих стінках, які оснащені DIN-рейкою. В якості індикаторів використовуються світлодіоди підвищеної яскравості, оскільки регулятор встановлюється на відкритих місцевостях, і пряме сонячне світло може значно ускладнити сприйняття інформації оператором. В конструкції використовуються лише уніфіковані деталі, розробка друкованої плати ведеться в сучасній САПР, тому конструкцію при необхідності можна модернізувати.

Мікропроцесорний блок вимірювальної станції (рис. 4.7) виконано на основі мікроконтролера PIC16F690. До аналогових входів його підключені датчики температури і вологості повітря, опадомір. У мікроконтролері апаратно присутній інтерфейс RS-232 для можливості підключення радіомодема RC-232C або GSM модема SIM300C. Для синхронізації використовується внутрішній генератор. Також є можливість підключення пульта оператора для контролю і налагодження необхідних параметрів.

Переносний пульт керування оператора. При роботі гідрорегулятора необхідно періодично проводити огляд його стану, перевірку коректності його роботи тощо. Тому конструкцією передбачено виносний портативний пульт керування оператора (рис. 4.8). З його допомогою оператор має можливість знімати значення поточних параметрів стану, вводити в регулятор розраховане значення задаючого параметру, діагностувати стан всієї системи.

Пульт керування під'єднується за допомогою роз'єму DB25 (LPT). Як тільки пульт під'єднано, на нього починає поступати напруга і індикатори відображають значення параметрів.

При від'єднаному пульті для економії ресурсів мікроконтролера та зниження енергозатрат на його функціонування передбачено програмне

блокування режиму вводу та виводу даних. Принципова електрична схема та технічна реалізація блоку семисегментних індикаторів наведені на рис. 4.9-4.10.

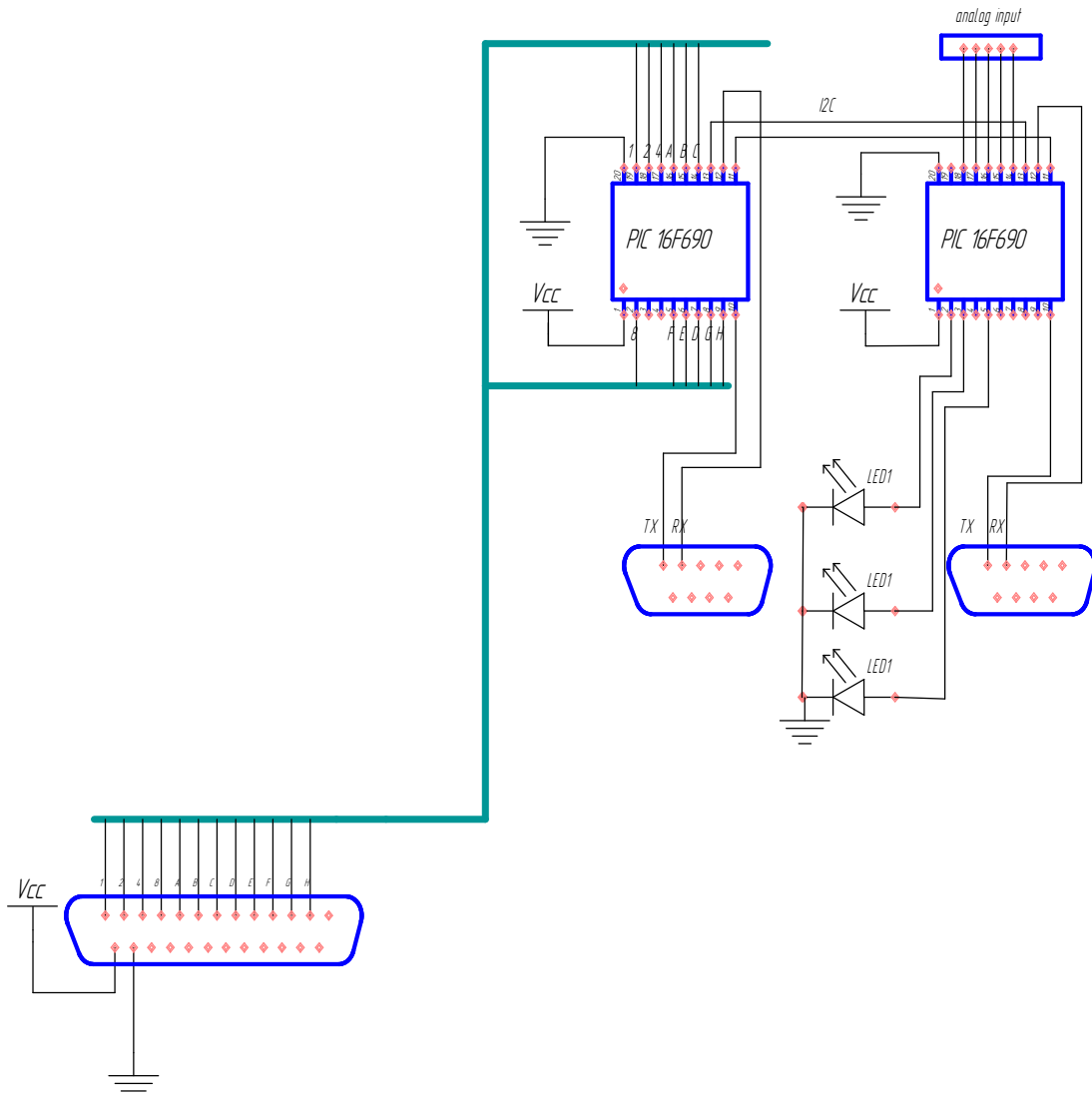


Рисунок 4.7 – Будова мікропроцесорного блоку виміральної станції

В сучасних умовах, враховуючи соціальні фактори, необхідно передбачити обмеження доступу до мікропроцесорної частини регулятора, тому що зміна будь-яких параметрів регулятора некомпетентними особами може призвести до виходу з ладу як самого гідрорегулятора, так і всієї системи в цілому.

Для виводу необхідної інформації про параметри стану використані світлодіодні семисегментні індикатори із загальним анодом. Дане рішення являється найбільш оптимальним, оскільки експлуатація всієї системи проводиться в умовах падіння прямих сонячних променів, тому використання

світлодіодних індикаторів сприяє кращому сприйняттю параметрів оператором. Технічно пульт оператора виконано в уніфікованому корпусі для електротехнічних пристроїв Z101. В процесі розробки корпус був доопрацьований для можливості монтажу на DIN-рейку. Керування семисегментними індикаторами відбувається за допомогою двох інтегральних мікросхем K176ИД2 та K155ИД3. Перша мікросхема являє собою дешифратор двійково-десятькового коду в код семисегментного індикатора. Для відображення всіх сегментів індикатора необхідно задіяти лише 4 дискретних виходи мікроконтролера. Мікросхема K176ИД2 перетворить код, який подано на входи 1-2-4-8, в код десятичного числа семисегментного індикатора. Також в даній мікросхемі існують сервісні входи С S К, при необхідності можна задіяти і їх, якщо нам необхідні будуть додаткові функції по відображенню числових значень на індикаторі.

Мікросхема K155ИД3 являє собою дешифратор-демультиплексор 4 лінії на 16. Вона виконує роль анодного дешифратора семисегментних індикаторів. Тобто основна її задача полягає в тому, щоб у певний момент часу почергово вмикати відповідний семисегментний індикатор. Оскільки вона має 4 входи двійкового коду, то максимальна кількість індикаторів складає $n=2^4=16$. В нашій системі використовується 12 індикаторів, тому вона повністю задовольняє поставленим вимогам.

Алгоритм роботи відображення параметрів на семисегментних індикаторах наступний: в певний момент часу мікросхема K155ИД3 активує один індикатор і в той самий час інша мікросхема K146ИД2 генерує на виходах двійково-десятьковий код семисегментного індикатора, в залежності від того яке значення при аналогово-цифровому перетворенні отримав контролер. Затримка між перемиканнями індикаторів вибирається експериментальним шляхом, цей час залежить від частоти роботи мікроконтролера та параметрів мікросхем дешифраторів. Зазвичай він не має перевищувати 15-20 мкс. В пульті керування також передбачена функція ручного задання керуючого параметру.

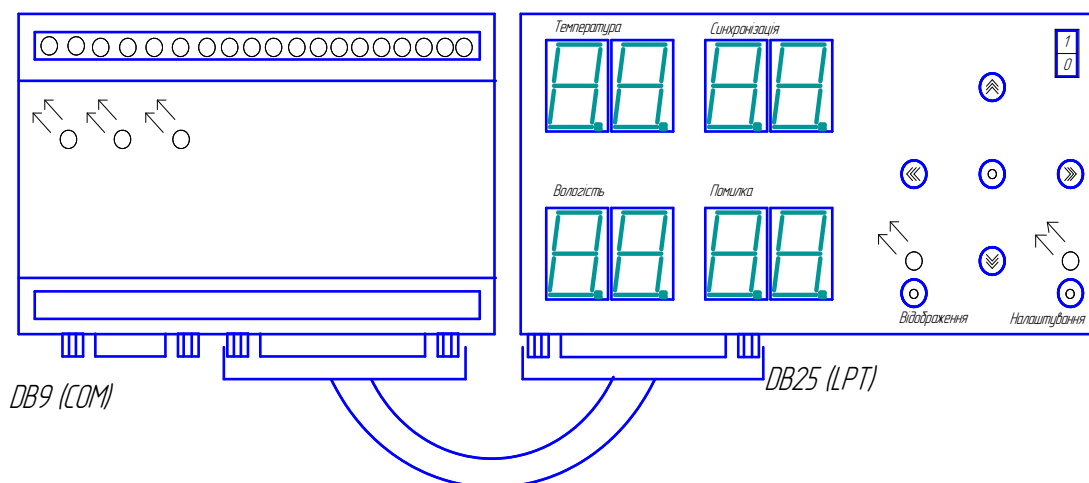


Рисунок 4.8 – Будова переносного пульта керування оператора

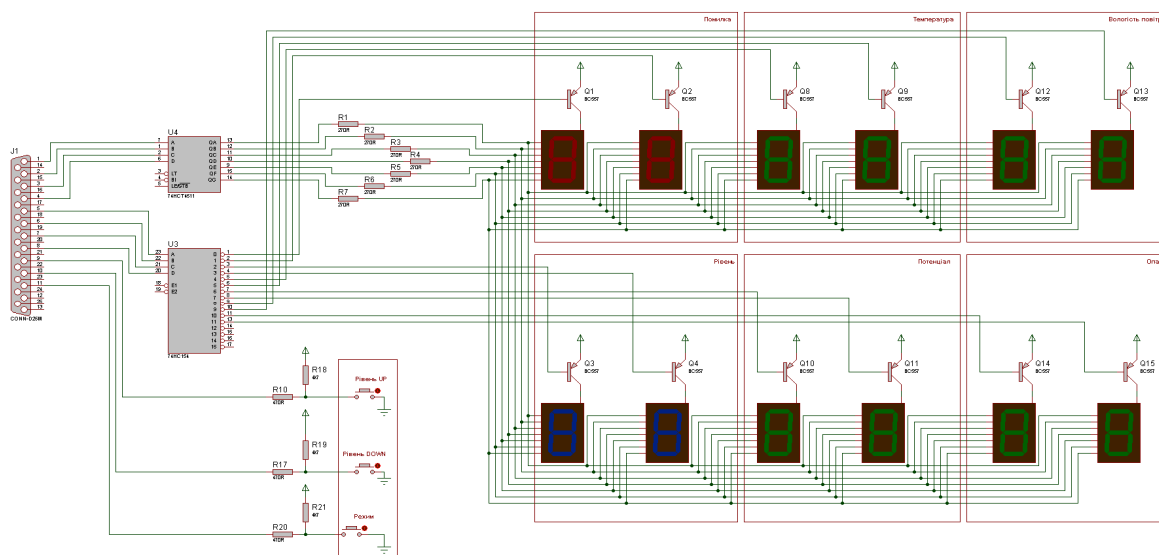


Рисунок 4.9 – Принципова електрична схема блоку семисегментних індикаторів

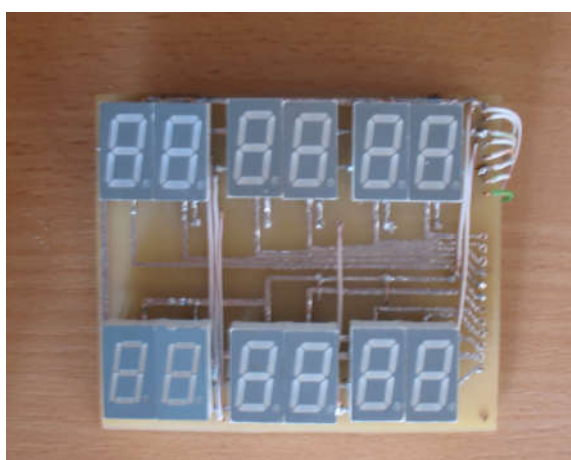


Рисунок 4.10 – Технічна реалізація блоку семисегментних індикаторів

Оскільки система модульна, то замовник може не використовувати блоки для безпроводної передачі параметрів (радіомодуль, GSM-модем), в даному випадку він може в ручному режимі змінювати параметр рівня. Альтернативою блоку із використанням семисегментних індикаторів є модуль із застосуванням рідкокристалічного індикатора (LCD екрану). Основу блоку становить рідкокристалічний індикатор Ampire AC-162 AB. Він являє собою модуль із світлодіодною підсвіткою, може відображати 2 рядки символів по 16 символів в кожному. Дану конструкцію операторського пульта доцільно використовувати в дослідних роботах, оскільки LCD індикатор досить інформативний, а в лабораторних умовах сприйняття інформації не спотворюють побічні фактори. Принципова електрична схема та технічна реалізація індикаторного блоку з LCD-екраном наведені на рис. 4.11, 4.12.

Блок дискретних силових виходів (рис.4.13) реалізовано в уніфікованому корпусі для електротехнічних пристроїв Z104K. Основна задача системи полягає у керуванні електромагнітними клапанами в залежності від значення РГВ. Оскільки вся система працює на +5-вольтовій логіці, а клапани працюють від напруги +12/24 В, то необхідно розробити силову частину. Основою є набір релейних елементів HLS-14F2. Котушка реле активується напругою +5 В, при цьому замикається пара контактів, до яких під'єднані електромагнітні клапани. У корпусі вмонтовані 7 світлодіодних індикаторів для відображення стану кожного з семи релейних елементів, таким чином оператор зможе оперативно контролювати коректність алгоритму керування. Оскільки дискретні виходи контролера є малопотужні, то активація котушки здійснюється через транзисторний ключ. Технічна реалізація релейного силового блоку наведена на рис. 4.14.

Блок контролю напруги. Для повного функціонування системи необхідне постійне електричне живлення. Оскільки основними експлуатаційними місцями нашої системи керування є поля та інші сільськогосподарські ділянки, то особливу увагу слід приділити системі

енергопостачання. Основою системи контролю напруги є мікропроцесорний блок на основі мікроконтролера PIC16F690.

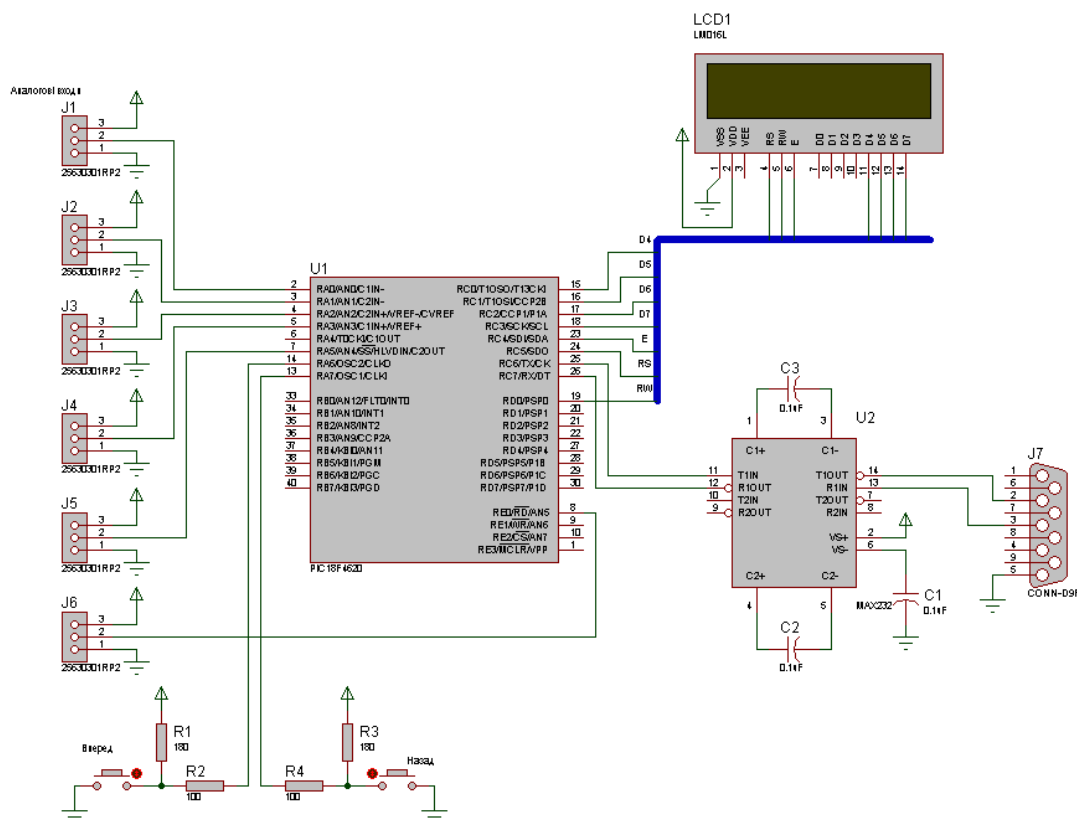


Рисунок 4.11 – Принципова електрична схема індикаторного блоку з LCD-екраном



Рисунок 4.12 – Технічна реалізація індикаторного блоку з LCD-екраном

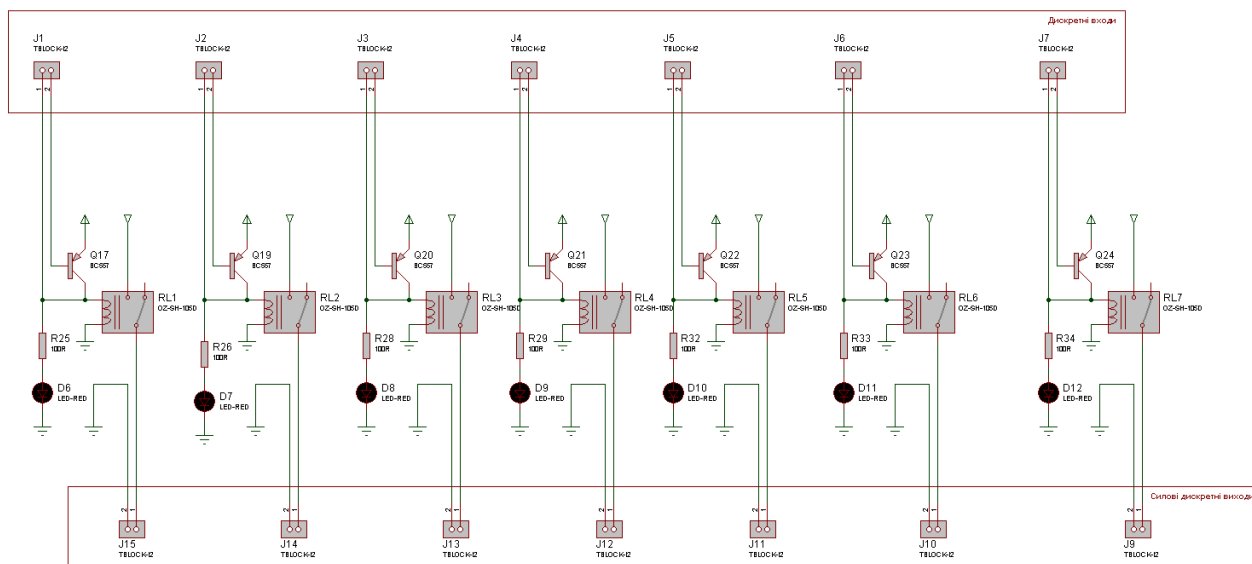


Рисунок 4.13 – Принципова електрична схема релейного силового блоку

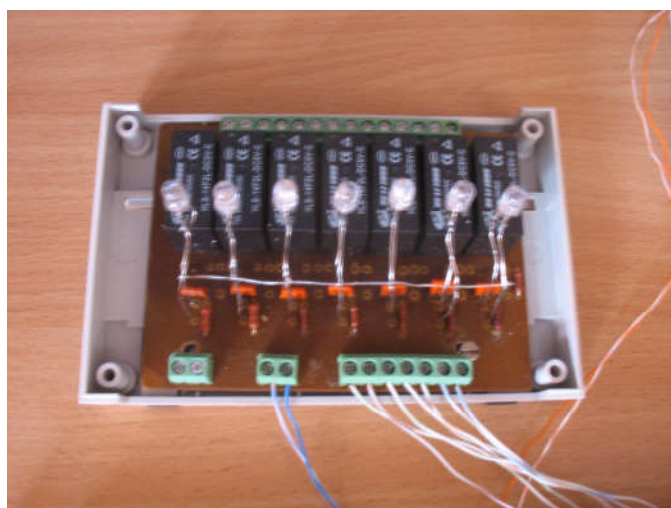


Рисунок 4.14 – Технічна реалізація релейного силового блоку

Конструктивно блок виконаний в уніфікованому корпусі та має 2 входи для джерел живлення, 1 вихід для навантаження, семисегментний індикатор для введення початкових налаштувань, світлодіодні індикатори для відображення поточного стану роботи (рис. 4.15). До першого входу під'єднана сонячна акумулятивна панель із послідовним перетворювачем та стабілізатором вихідної напруги типу LM317A, до другого входу під'єднана високоємнісна нікель-кадмієва акумуляторна батарея. У першому режимі модуль функціонує наступним чином: після подання вхідної напруги з сонячної панелі необхідно

здійснити налаштування мікропроцесорного регулятора на чутливість до вхідної напруги з першого входу. Налаштування здійснюється мікрокнопкою з кроком 10%. Після налаштування на вихід блоку подається напруга, і вся система починає функціонувати. Мікроконтролер аналізує вхідну напругу і порівнює її із заданим значенням. Якщо напруга знижується до критичної межі, звучить звуковий сигнал, що свідчить про настання передаварійного режиму. Після проходження аварійної межі мікроконтролер подає сигнал на електричний ключ, через який подається напруга на котушку релейного елемента. Після перемикання реле на вихід блоку подається напруга із резервної батареї живлення. Оскільки на виході блоку встановлені високоємнісні конденсатори, то перехідний процес при перемиканні реле згладжується, тому він є некритичним для системи. Після того, як рівень вхідної напруги стабілізується, відбувається автоматична дозарядка нікель-кадмієвого акумулятора. Таким чином, завдяки даному рішенню ми добилися автономної та безперервної роботи як в денний, так і в нічний час протягом тривалого періоду часу без втручання людини. Принципова електрична схема та технічна реалізація блоку контролю напруги наведені на рис. 4.16, 4.17.

Технічна реалізація всієї системи керування наведена на рис. 4.18. Розроблена система має значний потенціал у плані подальших впроваджень та модернізацій, оскільки ми досягаємо високої якості регулювання у порівнянні із застарілими гідравлічними системами регулювання водно-повітряного режиму ґрунту. Оскільки наша система не потребує значних затрат на виготовлення, то стає можливим дрібносерійне виробництво для дослідницьких та господарських потреб.

Давачі вимірювального майданчику та гідрорегулятора. Склад системи (рис. 4.19): TAI8540D 1-Wire давач вологості повітря; TAI8570 1-Wire давач тиску; TAI8520 1-Wire давач температури; TAI8575B 1-Wire давач рівня опадів; Wind Instrument (Anemometer, Wind Direction Sensor); DS9490R USB 1-Wire Adapter.

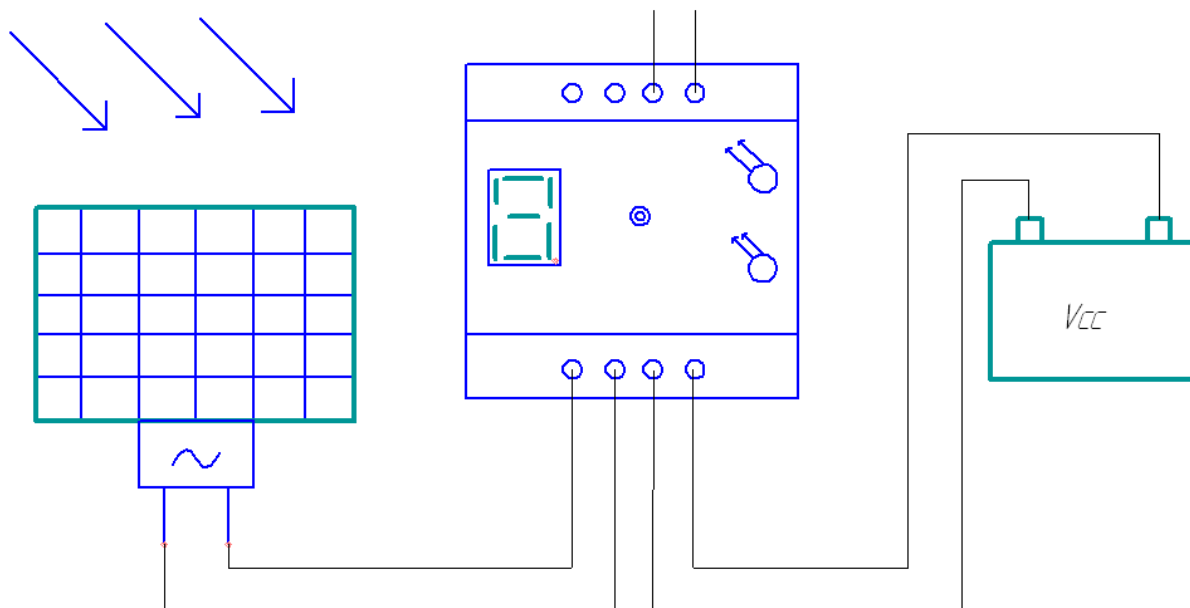


Рисунок 4.15 – Будова блоку контролю напруги

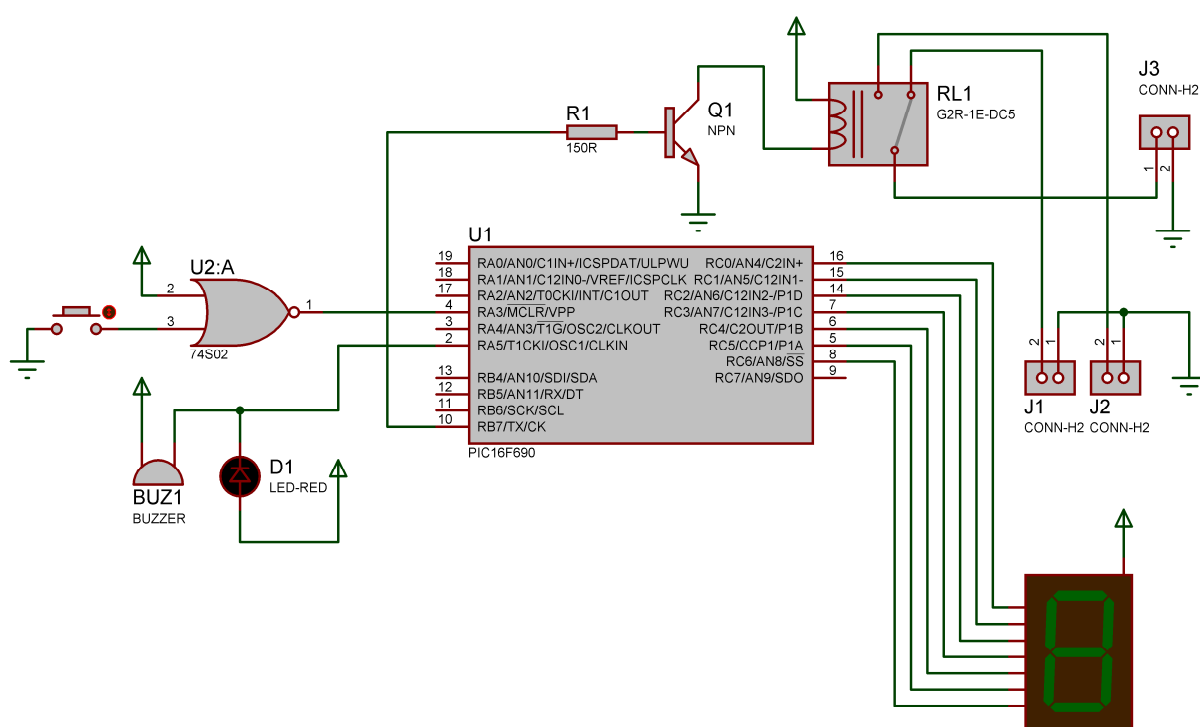


Рисунок 4.16 – Принципова електрична схема блоку контролю напруги



Рисунок 4.17 – Технічна реалізація блоку контролю напруги



Рисунок 4.18 – Технічна реалізація всієї системи керування

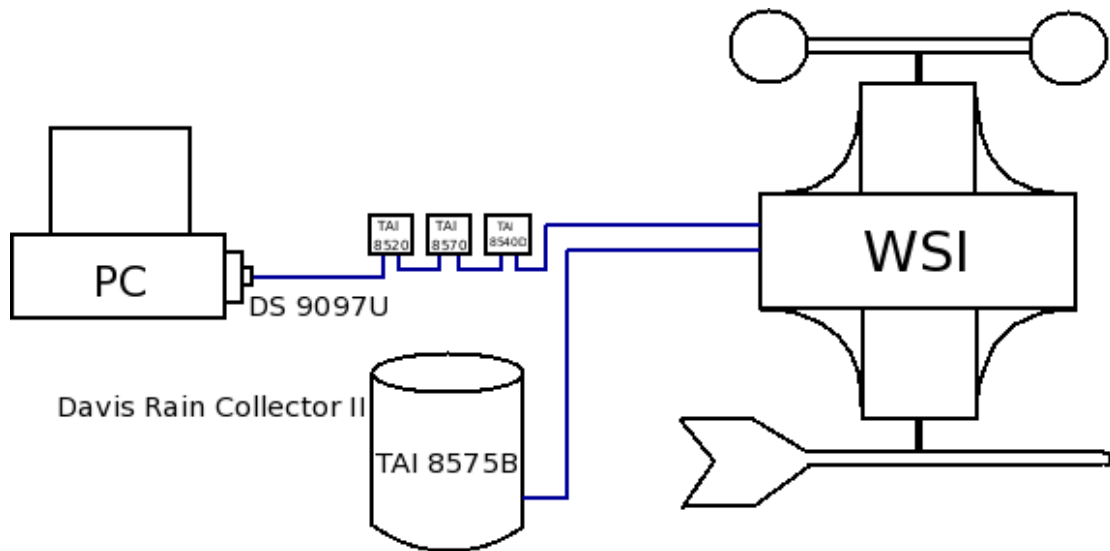


Рисунок 4.19 – Схема підключення погодної станції

Тензіометр (рис. 4.20) являє собою прилад, призначений для вимірювання всмоктуючого (від'ємного у порівнянні з атмосферним) тиску вологи у ненасичених ґрунтах зони аерації [25]. Тензіометр представляє собою закупорену трубку, наповнену водою, з пористим керамічним фільтром на кінці. Принцип роботи тензіометра заснований на досягненні рівноваги вологи в ґрунті та води в зонді тензіометра шляхом зниження тиску води в тензіометрі до тиску вологи в ґрунті. Пористий зонд – основну частину тензіометра виготовляють з керамічного матеріалу, в якому розмір максимальних пор складає не більше 1 мікрона. Якщо встановити тензіометр в ґрунті, то вода за рахунок капілярної тяги буде переміщатися через керамічний наконечник у більш сухий ґрунт, створюючи від'ємний тиск у закупореній трубці. Цей від'ємний тиск, так зване напруження всмоктування, може бути виміряний як показник рівня вологості ґрунту. Чим сухіший ґрунт, тим вище його напруження всмоктування. При збільшенні вологості ґрунту сила, з якою вода витягається з тензіометра, зменшується, і частина вологи надходить назад у тензіометр за рахунок негативного тиску в його трубці. При цьому величина від'ємного тиску зменшується.

Для чіткої роботи і швидкої реакції тензіометра на зміни вологості дуже важливим є хороший контакт керамічного наконечника з ґрунтом. Таким

чином, високе напруження всмоктування відповідає низькій вологості ґрунту, а низьке напруження всмоктування – високій вологості ґрунту. Напруження всмоктування відповідає силі, з якою вода утримується ґрунтом і яка, відповідно, необхідна кореням, щоб узяти вологу з ґрунту. Тензіометр безпосередньо вимірює цю дуже важливу для рослин ґрунтову характеристику.

Тензіометр з автоматичною дозаправкою. При роботі тензіометра в зоні нижньої границі оптимального діапазону вологості виникає необхідність його періодичної розгерметизації для дозаправки водою, тому він не може бути використаний при неперервній роботі на протязі періоду вегетації рослин. З метою підвищення точності вимірювань та покращення експлуатаційних характеристик було створено тензіометр з автоматичною дозаправкою [25] (рис. 4.21).

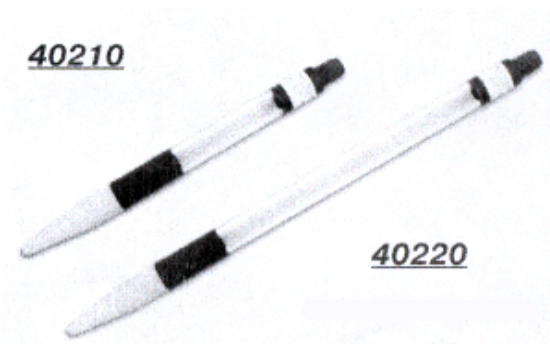


Рисунок 4.20 – Зовнішній вигляд тензіометра

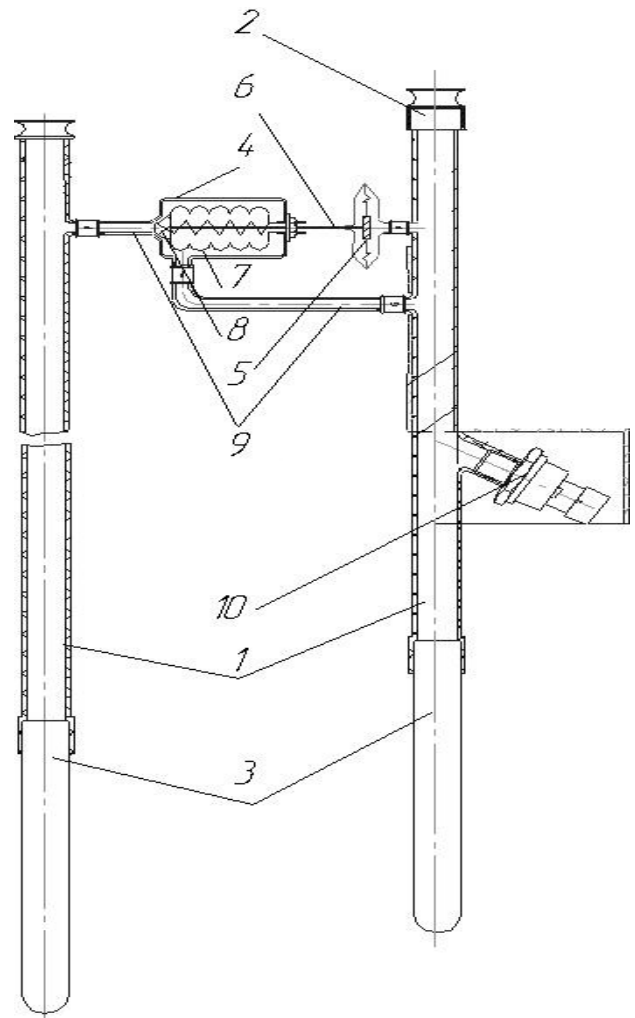


Рисунок 4.21 – Тензіометр з автоматичною дозаправкою

Конструкція містить два циліндри, один з яких основний – вимірювальний, другий – допоміжний. Вони з'єднані через гідравлічний перемикач з мембранним перетворювачем, який дозволяє здійснити долив води у вимірювальний циліндр без необхідності розгерметизації, при досягненні в процесі вимірювання верхньої границі розрідження ($-0.8...-0.9$ атм) експлуатаційного діапазону вимірювань тензометричного методу. Тензіометр з автоматичною дозаправкою представляє собою два циліндри 1, заповнених водою. Верхня частина основного циліндра містить повітрявловлювач 2.

Нижня частина циліндрів герметично з'єднана з керамічними фільтрами 3, які встановлюються на різних глибинах в ґрунт (один в зоні кореневого шару, інший в зоні повного насичення – зоні рівня ґрунтових вод). З'єднання основного і допоміжного циліндрів реалізовано через гідравлічний перемикач 4 з мембранним перетворювачем. Мембранний перетворювач - пружна металева мембрана 5, яка з'єднана через шток 6 з сильфоном 7. Запірний клапан 8 забезпечує пропуск води по магістралі з пластикових трубок 9. При вимірюванні всмоктуючого тиску ґрунтової вологи в експлуатаційному діапазоні вимірювань тензометричного методу ($0...-0.85$ атм) запірний клапан 8 тензіометра з автоматичною дозаправкою закритий, що забезпечує основний експлуатаційний режим роботи. При зниженні вологості нижче оптимального діапазону і відповідному збільшенню розрідження ($> - 0.85$ атм) у вимірювальному циліндрі 1 під дією мембранного перетворювача 5 відкривається запірний клапан 8 і забезпечується автоматичний долив води в порожнину циліндра. При цьому і подальшому зниженні вологості зберігається робочий стан тензіометра з автоматичною дозаправкою. При підвищенні вологості і зниженні розрідження ($< - 0.85$ атм) запірний клапан 8 закривається і тензіометр переходить в основний експлуатаційний режим роботи.

Основний циліндр обладнаний електронним давачем 10 для вимірювання розрідження, що створюється в його порожнині в процесі вимірювання всмоктуючого тиску ґрунтової вологи. У якості давача розрідження пропонується використати давач DMP-331 з діапазоном вимірювання $-1...0$ бар

(або $-0.987 \dots 0$ атм) та вихідним сигналом $0/4 \dots 20$ мА, $0 \dots 10$ В, $0 \dots 5$ В, HART-протокол.

Тензіометр з автоматичною дозаправкою забезпечує підвищення точності вимірювання всмоктуючого тиску ґрунтової вологи, зниження експлуатаційних затрат, можливість використання в автоматизованих системах вологозабезпечення рослин. Вказані переваги в кінцевому рахунку дозволяють підвищити врожайність вирощуваних сільськогосподарських культур.

4.2 Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю

Роботу АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні передбачено у наступних режимах: автоматичний, автоматичний водо- та енергозберігаючий, ручний дистанційний, ручний за місцем.

Згідно цих вимог розроблено програмне забезпечення для всіх вузлів системи керування.

4.2.1 Розробка програмного забезпечення нижнього рівня автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю

Програмне забезпечення мікропроцесорного блоку гідрорегулятора вирішує наступні задачі:

- зчитування даних з датчиків всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту, рівня води у керуючому колодязі; усереднення виміряних значень протягом доби;
- обмін даними з вимірювальною станцією за допомогою радіозв'язку на основі модуля RC-232C;
- подача керуючих сигналів на електромагнітні клапани для зміни рівня води у керуючому колодязі і, відповідно, РГВ;

- аналіз параметрів роботи системи: аналіз стану ліній керування електромагнітними клапанами; індикація процесів прийому-передачі даних з іншими елементами системи; контроль за напругою живлення;
- виведення повідомлення про помилку та її код на пульт оператора при ідентифікації несправності;
- виведення на переносний пульт оператора значення вологості ґрунту та РГВ;
- задання керуючих параметрів з переносного пульта оператора в ручному режимі керування.

Програмне забезпечення мікропроцесорного блоку вимірювальної станції вирішує наступні задачі:

- зчитування даних з датчиків метеопараметрів: температури та відносної вологості повітря, кількості опадів; усереднення вимірних значень протягом доби;
- обмін даними з АРМ диспетчера за допомогою GSM зв'язку; на АРМ передаються усереднені значення усіх вимірних параметрів протягом доби;
- обмін даними з мікропроцесорними блоками гідравлічних регуляторів за допомогою радіозв'язку;
- виведення інформації на дисплей переносного пульта оператора.

Передача даних на АРМ здійснюється з використанням модифікованого протоколу RS-232. Після опрацювання АЦП мікроконтролера значення датчика, 8-розрядний код передається в одному кадрі інформації. Після стопового біта передається службова інформація про номер датчика. Фрагмент кадру передачі інформації наведено на рис. 4.22.

Програмне забезпечення мікропроцесорного блоку переносного пульта керування з LCD-екраном вирішує наступні задачі:

- виведення інформації про значення технологічних параметрів;
- ручне задання керуючого параметру (заданого значення РГВ).

Програмне забезпечення мікропроцесорного блоку контролю напруги вирішує наступні задачі:

- автоматичне перемикання між двома джерелами напруги: сонячною батареєю та нікель-кадмієвою акумуляторною батареєю;
- введення початкових налаштувань та відображення поточного значення напруги на семисегментному індикаторі;
- відображення поточного стану роботи за допомогою світлодіодних індикаторів;
- подання звукового сигналу при настанні передаварійного режиму.

Схема роботи блоку контролю напруги наведена на рис. 4.23, де $U_{ж,д}$ - допустима напруга живлення, $U_{СБ}$ - напруга сонячної батареї, $U_{АКБ}$ - напруга акумуляторної батареї (АКБ), U_3 - сигнал керування на зарядження акумуляторної батареї від сонячної батареї, $U_к$ - сигнал перемикання живлення системи на АКБ.

4.2.2 Розробка програмного забезпечення верхнього рівня автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю

Програмне забезпечення АРМ диспетчера ОЗС вирішує наступні задачі:

- обмін даними з вимірювальною станцією за допомогою GSM зв'язку; (при відсутності даччів передбачена можливість введення значень параметрів вручну оператором);
- обрахунок дефіциту вологості повітря за температурою і відносною вологістю повітря;
- зчитування даних метеопрогнозу через мережу Internet або введення даних метеопрогнозу вручну;
- обрахунок середніх значень даних метеопрогнозу за період керування;
- задання періоду керування – періоду зміни керуючого сигналу;
- вибір режиму роботи АСК: автоматичний, автоматичний водо- та енергозберігаючий, ручний дистанційний;
- формування вхідного вектора для регулятора всмоктуючого тиску ґрунту;



Рисунок 4.22 – Фрагмент кадру передачі інформації

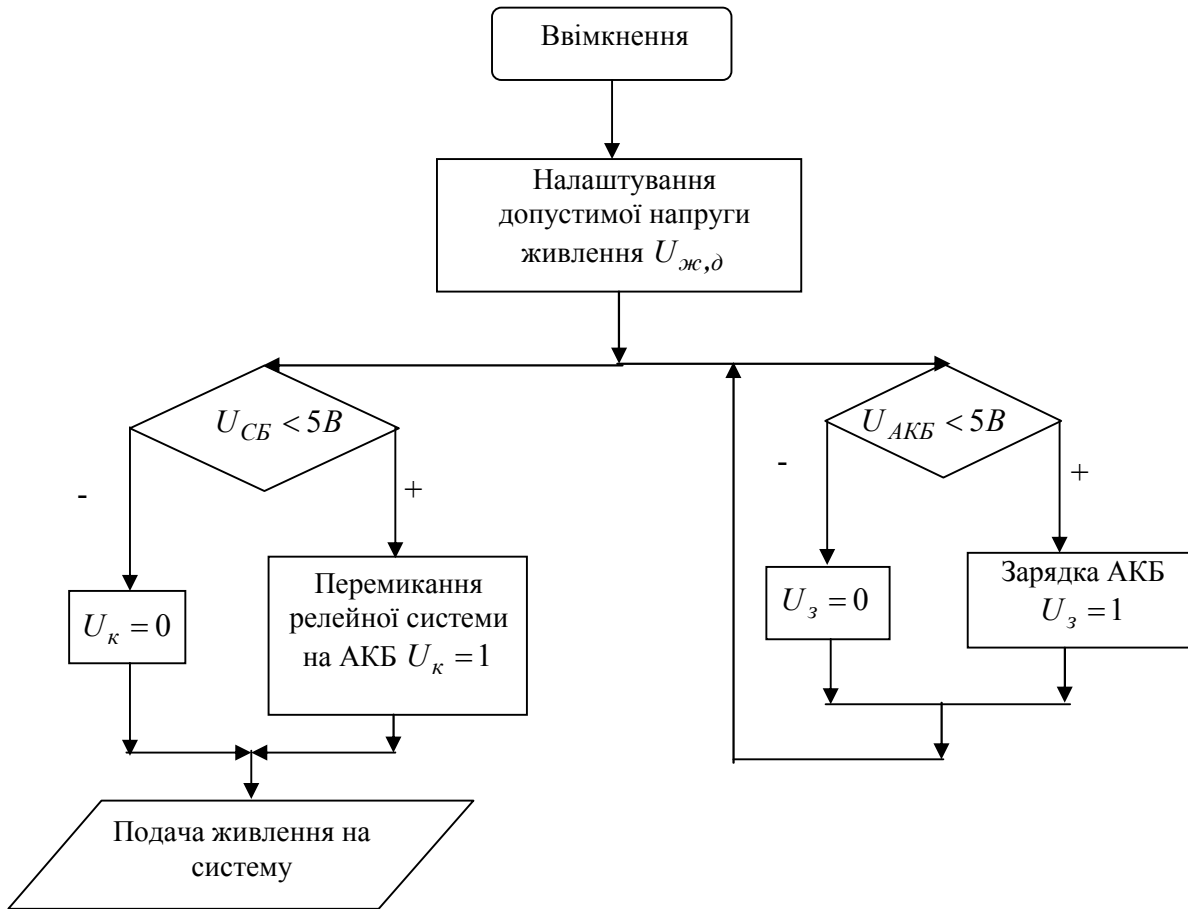


Рисунок 4.23 – Схема роботи блоку контролю напруги

- введення завдання по вологості ґрунту або по всмоктуючому тиску від оператора та перехід від одних значень до інших за основною гідрофізичною характеристикою для даного типу ґрунту;
- обрахунок заданого значення РГВ;
- корекція розрахованого значення РГВ, враховуючи ймовірне значення врожайності, за допомогою методів прийняття рішення в умовах багатокритеріальності;
- ведення загальної бази даних всіх технологічних параметрів;
- візуалізація ходу технологічного процесу.

У випадку, якщо відсутній зв'язок з мережею Інтернет, оператор може ввести дані метеопрогнозу вручну за допомогою інтерфейсу користувача. У випадку відсутності якихось датчиків у системі керування для вимірювання параметрів в автоматичному режимі, наприклад, вимірювання всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту лабораторним методом, їх значення також можна ввести в ручному режимі за допомогою меню. Головний Екран інтерфейсу оператора ОЗС показаний на рис. 4.26. У програмне забезпечення АРМ оператора додані 2 ОЗС: Рівненська (м. Шубків) та Обухівська (м. Обухів Київської обл.) (рис. 4.27, 4.28). У налаштуваннях можна вибрати одну з них.

Далі при переході на вкладку Робоча станція бачимо мнемосхему відповідної станції, дані про погоду, виміряні значення РГВ та всмоктуючого тиску ґрунту у трьох шарах. Оператор вибирає фазу розвитку рослини, тобто в якому шарі ґрунту знаходиться коренева система рослин на даному етапі, режим роботи АСК, вводить задане значення всмоктуючого тиску ґрунту згідно рекомендацій щодо забезпечення вологою даного виду рослин на даній фазі їх розвитку. При цьому згідно обраного режиму роботи (рис. 4.24) та шару ґрунту розраховується задане значення РГВ за допомогою нейронної мережі. При цьому у нейромережу підставляються вагові коефіцієнти згідно шару ґрунту та ОЗС. Якщо вибрано ручний дистанційний режим, то задаюче значення РГВ вводить оператор. Здійснюється перерахунок заданого всмоктуючого тиску

грунту згідно основної гідрофізичної характеристики та відображається на екрані.

При переході на вкладку Тренди доступні графіки зміни поточного та задаючого значень РГВ та вимірних всмоктуючих тисків ґрунту у трьох шарах у реальному режимі часу (рис. 4.29). На вкладці Погода доступні значення зміни температури та відносної вологості повітря (рис. 4.30). На вкладці Налаштування можна вибрати номери давачів РГВ та всмоктуючих тисків ґрунту, номер доступного СОМ порта для обміну даними з вимірювальною станцією (рис. 4.31). На вкладці Події показана інформація про оновлення погодних даних (рис. 4.25).

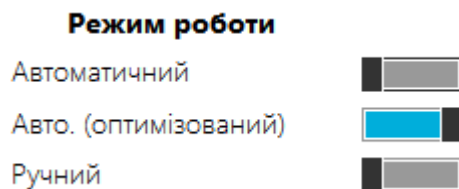


Рисунок 4.24 – Вибір режиму роботи АСК

| Робоча станція | | | |
|-----------------------|--------|------------------|--------------|
| Робоча станція | Тренди | Події | Налаштування |
| [06.07.2015 17:59:45] | | Погоду оновлено. | |
| [06.07.2015 17:59:34] | | Погоду оновлено. | |
| [06.07.2015 17:59:24] | | Погоду оновлено. | |
| [06.07.2015 17:59:14] | | Погоду оновлено. | |
| [06.07.2015 17:59:03] | | Погоду оновлено. | |
| [06.07.2015 17:58:53] | | Погоду оновлено. | |

Рисунок 4.25 – Відображення інформації про оновлення погодних даних

Є багато погодних інформерів, зчитування прогнозу погоди з яких є платним. Разом з тим, є можливість зчитувати дані з відкритого Інтернет ресурсу *openweathermap.org*, що дозволяє:

- отримувати дані про поточну погоду:
 - доступ до поточної погоди в будь-якій точці Землі, що включає в себе більше 200 тисяч міст;
 - дані про погоду швидко оновлюються і базуються на глобальних моделях та даних з понад 40 тис. погодних станцій;
 - отримання даних у форматах JSON, XML, або HTML;

Робоча станція

Робоча станція Тренди Події Налаштування

Сервер Параметри

База даних веб-сервера

Адреса сайту

http://webscada.ga/

Вибір міста

Місто

Шубків

Обухів

Шубків

Рисунок 4.26 – Головний екран графічного інтерфейсу оператора АРМ ОЗС

Робоча станція

Робоча станція Тренди Події Налаштування

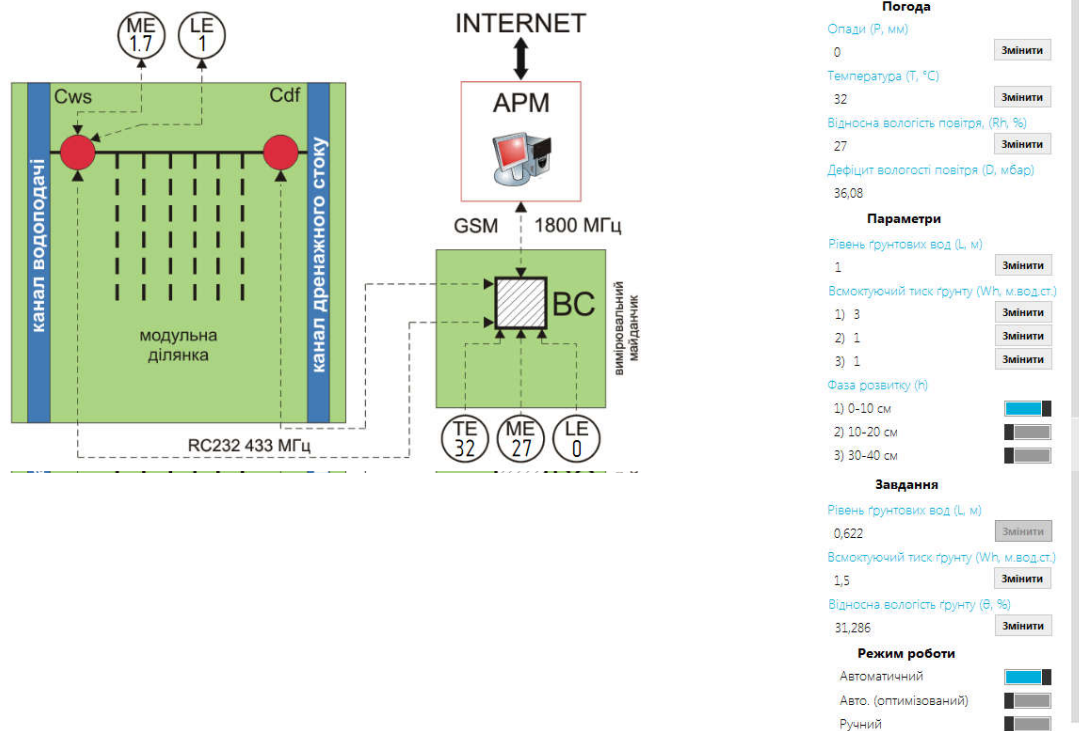


Рисунок 4.27 – Робоча станція Шубківської ОЗС

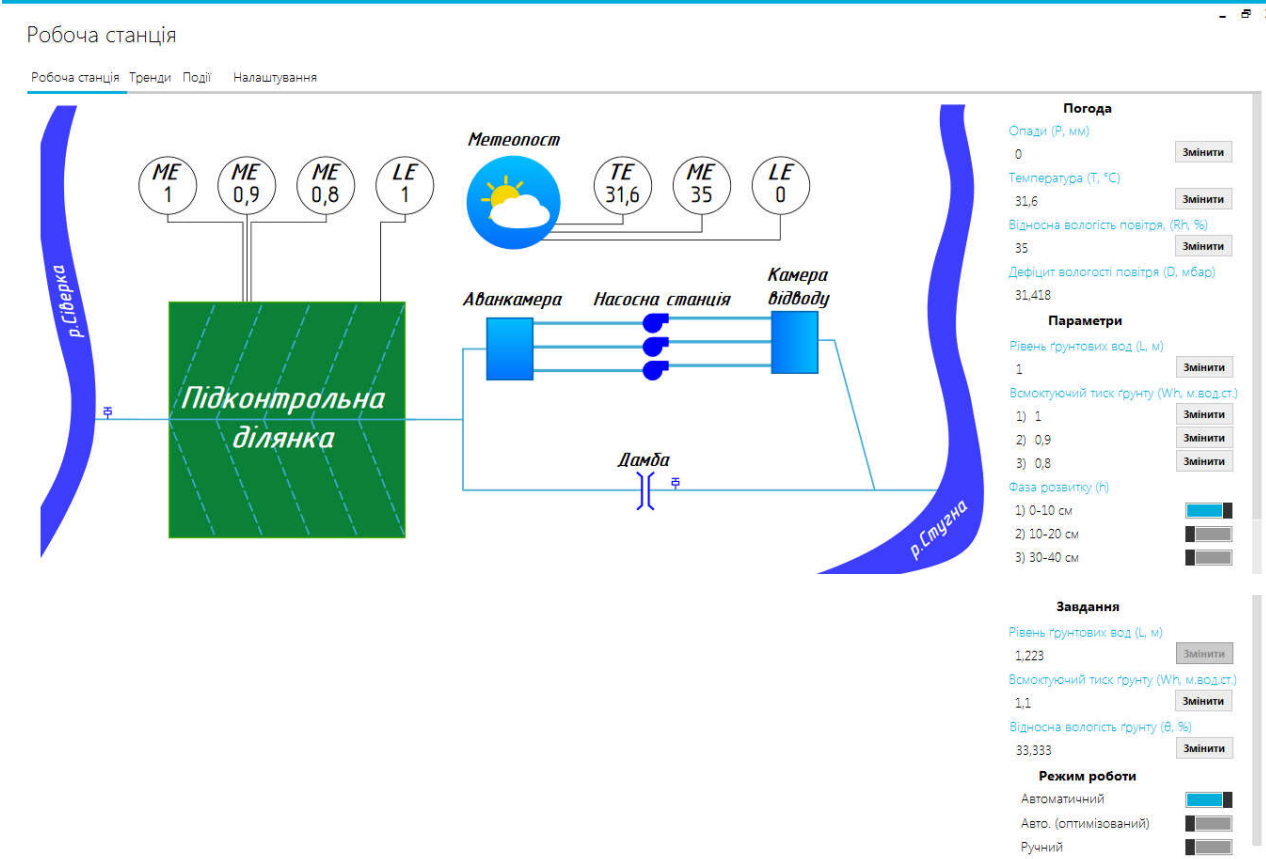


Рисунок 4.28 – Робоча станція Обухівської ОЗС

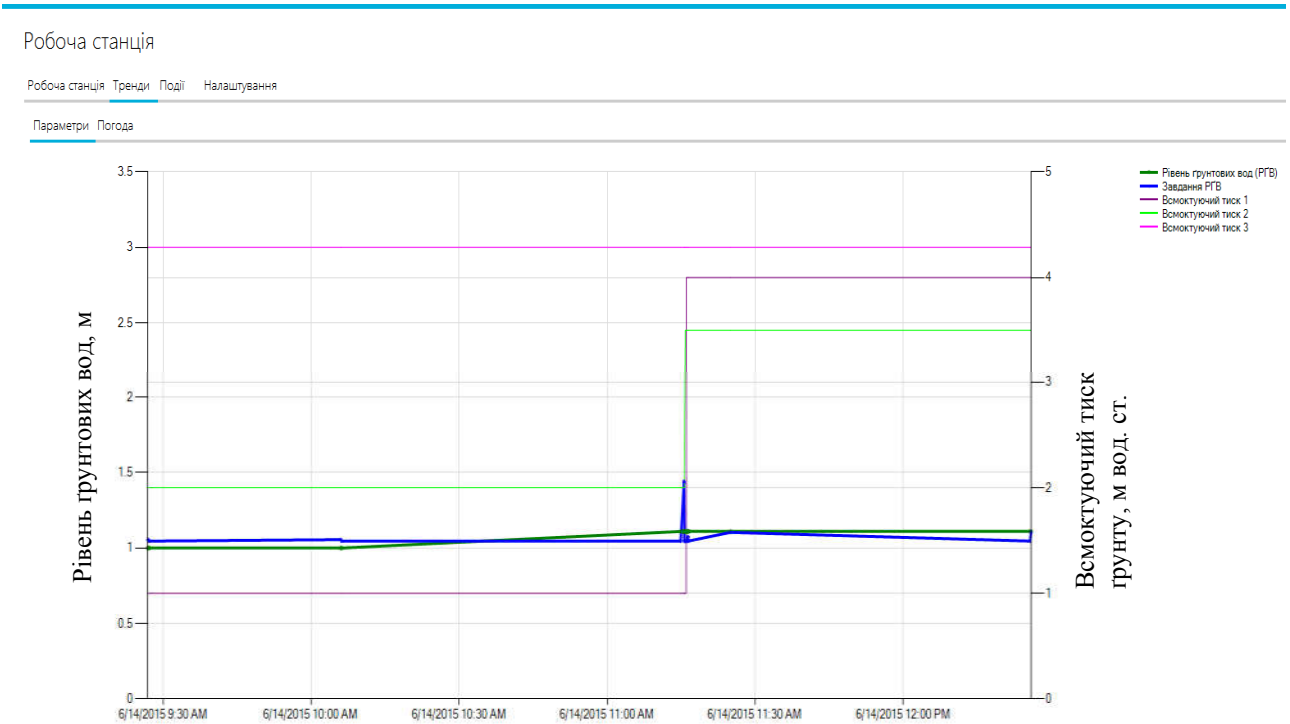


Рисунок 4.29 – Побудова трендів зміни значень параметрів (РГВ, завдання РГВ та всмоктуючих тисків ґрунту у різних шарах)

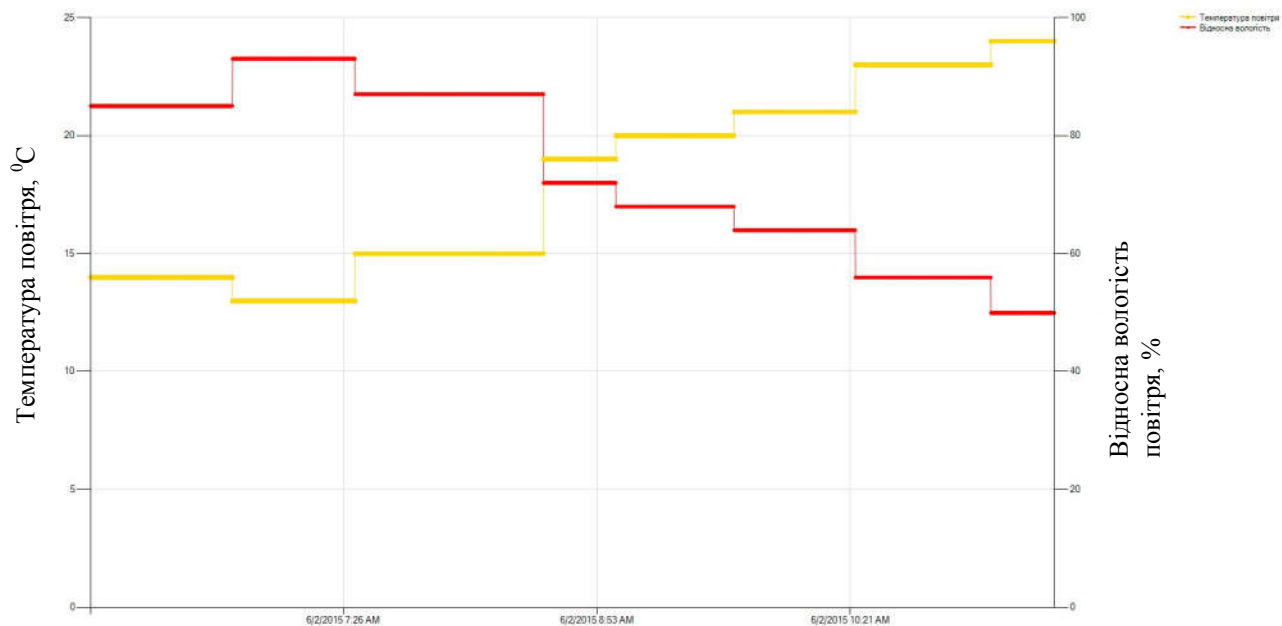


Рисунок 4.30 – Побудова трендів зміни значень відносної вологості та температури повітря

Робоча станція

Робоча станція Тренди Події Налаштування

Сервер Параметри

COM-порт

COM-порт модема

Номери датчиків

Рівень ґрунтових вод

Всмоктуючий тиск ґрунту (рівень 1)

Всмоктуючий тиск ґрунту (рівень 2)

Всмоктуючий тиск ґрунту (рівень 3)

Рисунок 4.31 – Налаштування обміну даними з вимірювальною станцією

- отримувати прогноз погоди на термін від 5 до 16 днів;
- переглядати історію зміни погоди.

Зручним також є можливість використовувати формат JSON, до появи якого єдиною альтернативою був тільки XML формат, що має більшу надлишковість у порівнянні з JSON, що впливає на час його обробки, а також більше часу займає його синтаксичний аналіз (парсинг). Як видно з рис. 4.32, можна отримати дані про опади, відносну вологість та температуру повітря, з яких можна визначити дефіцит вологості.

```

{
  "cod": "200",
  "message": 0.0581,
  "city": {
    "id": 698782,
    "name": "Obukhiv",
    "coord": {
      "lon": 30.622721,
      "lat": 50.10997
    },
    "country": "UA",
    "population": 31557
  },
  "cnt": 2,
  "list": [
    {
      "dt": 1434358800,
      "temp": {
        "day": 300.61,
        "min": 291.38,
        "max": 302.48,
        "night": 291.38,
        "eve": 302.48,
        "morn": 292.47
      },
      "pressure": 1007.07,
      "humidity": 65,
      "weather": [
        {
          "id": 501,
          "main": "Rain",
          "description": "moderate rain",
          "icon": "10d"
        }
      ],
      "speed": 4.63,
      "deg": 196,
      "clouds": 48,
      "rain": 5.12
    }
  ]
}

```

Рисунок 4.32 – Прогноз погоди на 2 дні (сьогоднішній і завтрашній) для с.м.т. Обухів

Отримання погоди здійснюється за допомогою звичайного GET-запиту, а отриманий текст у форматі JSON піддається синтаксичному аналізу за допомогою високошвидкісного Json.NET Framework, безкоштовного для комерційного використання, що швидший за стандартний метод синтаксичного

аналізу в JavaScript. Головна сторінка Web SCADA системи керування вологозабезпеченістю на рис. 4.33.

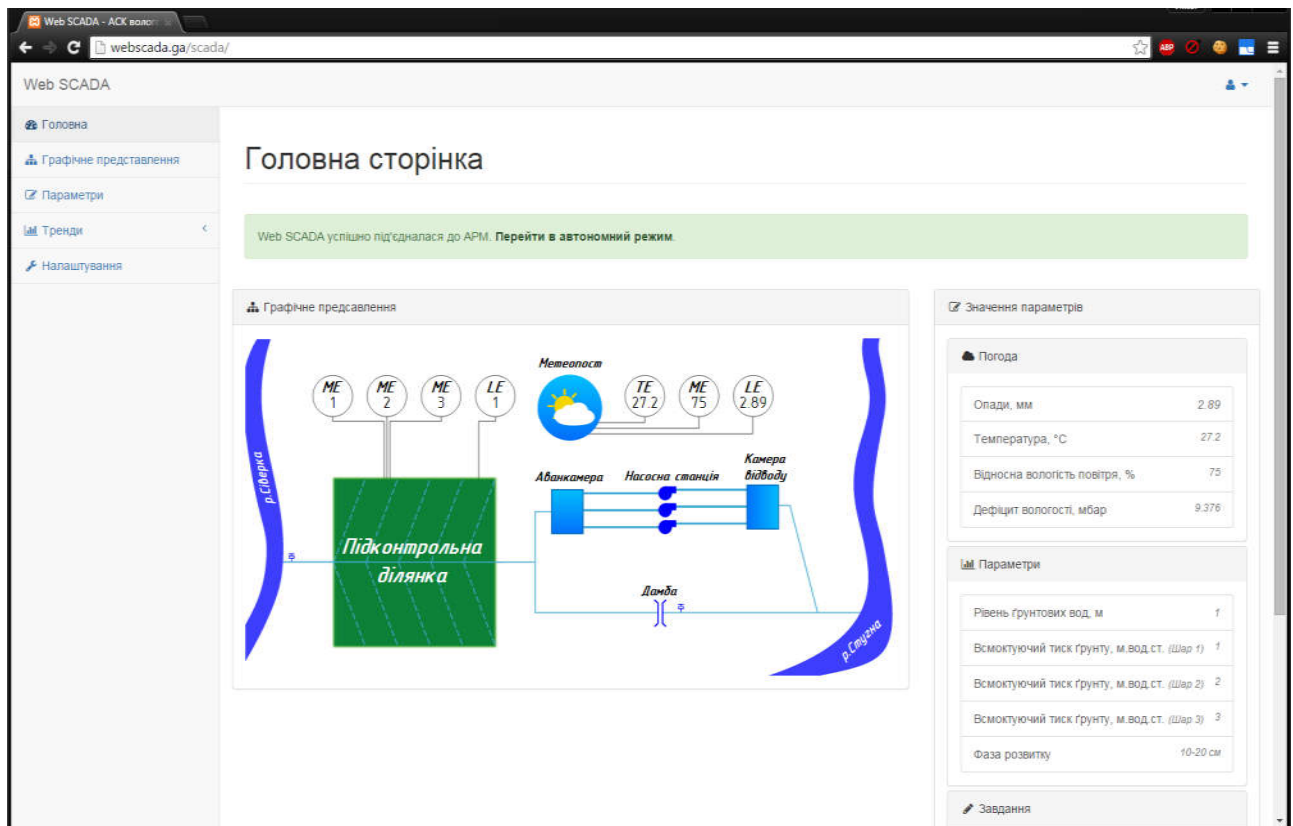


Рисунок 4.33 – Головна сторінка Web SCADA системи керування вологозабезпеченістю

У ПЗ АРМ оператора реалізовано також функцію передачі даних про хід технологічного процесу в Інтернет мережу в реальному режимі часу. Для цього використано технологію WebSocket. Даний протокол забезпечує двонаправлений повнодуплексний канал зв'язку через один TCP-сокет. WebSocket спроектовано для використання у веб-браузерах та веб-серверах, але може також використовуватись будь-яким клієнт-серверним додатком.

Зв'язок здійснюється через 80-й TCP-порт, а отже, його можна застосовувати в тих середовищах, де блокуються всі інші веб-з'єднання через фаєрвол. Щодо безпеки, то даний протокол дозволяє створювати зашифровані з'єднання. Програма для АРМ оператора реалізує в собі WebSocket сервер, що забезпечує передачу даних всім клієнтам Web SCADA в момент її

надходження, а також прийом та обробку запитів від клієнтів. Web SCADA ж, в свою чергу, виступає в ролі WebSocket клієнта і, здійснивши під'єднання до сервера, отримує можливість керувати ходом технологічного процесу. Окрім цього, АРМ постійно записує дані про зміну погоди та параметрів у локальну базу даних та в базу даних Web SCADA системи, що дозволяє навіть при відсутності під'єднання до сервера переглядати історію у вигляді інтерактивних графіків (рис. 4.34, 4.35). Окрім технології WebSocket, що використовує формат передачі JSON для взаємодії між клієнтом та сервером було використано набір інструментів Twitter Bootstrap, що створений для полегшення розробки прикладних програм web та сайтів. Він включає CSS, HTML та JS розширення та дозволяє забезпечити правильне та гарне відображення сторінок на пристроях з різними розмірами екрану. Навігація між сторінками відбувається за допомогою JQuery.Ajax, що забезпечує безперебійність підключення між Web SCADA та АРМ, а також динамічну зміну контенту. Для збереження даних використана база даних MySQL. Використання технології WebSocket доступно у більшості сучасних браузерів, що захоплює 86% усіх користувачів. Тому користуватися розробленою Web SCADA можна не тільки, використовуючи ПК та ноутбуки, а й планшети та інші мобільні пристрої (рис. 4.36). Як видно з рис. 4.37-4.39, розроблена Web SCADA працює на всіх сучасних пристроях та браузерах, що підтримують технологію WebSocket.

4.3 Впровадження розробленої автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур

Розроблені математичні моделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та методи керування всмоктуючим тиском (вологістю) ґрунту на основі нейронних мереж є інваріантними для різних ОЗС з підґрунтовим зволоженням та легко адаптуються до нових типів ґрунтів та кліматичних умов шляхом перенавчання нейронних мереж.



Рисунок 4.34 – Побудова трендів по архівних значеннях параметрів ґрунту

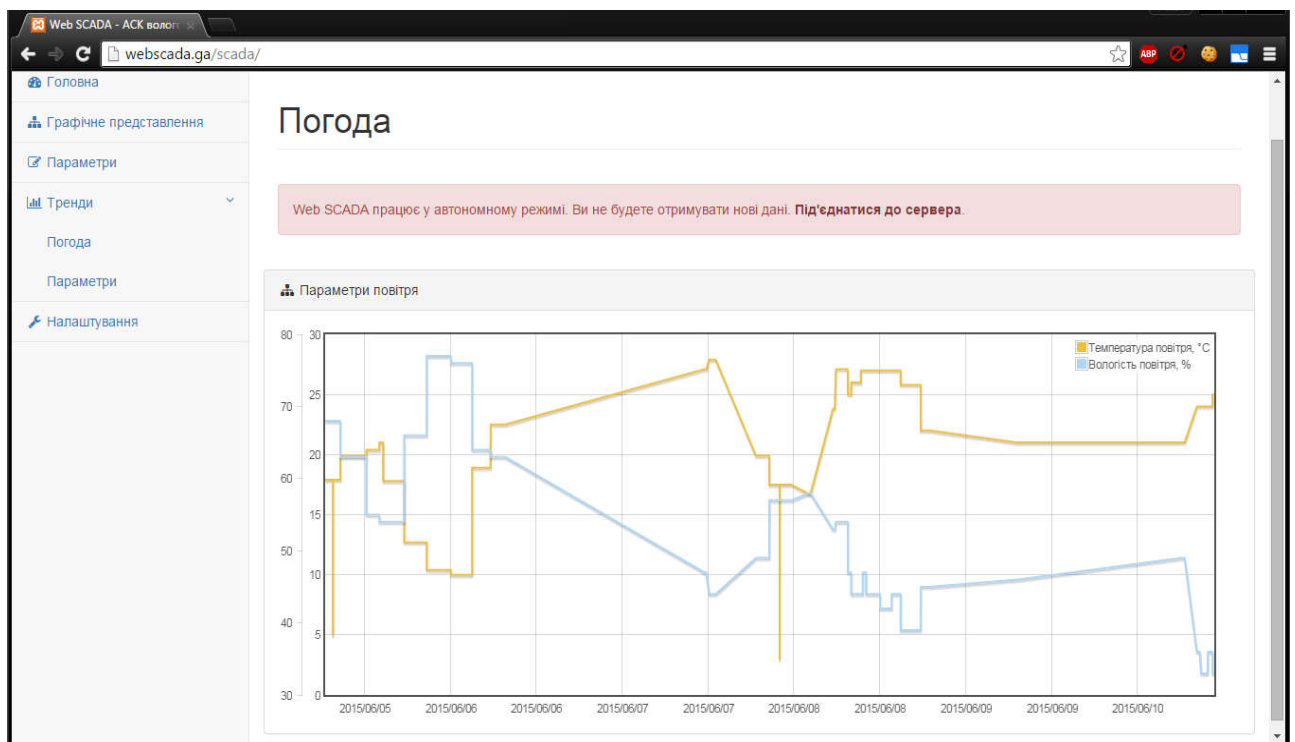


Рисунок 4.35 – Побудова трендів по архівних значеннях погодних даних

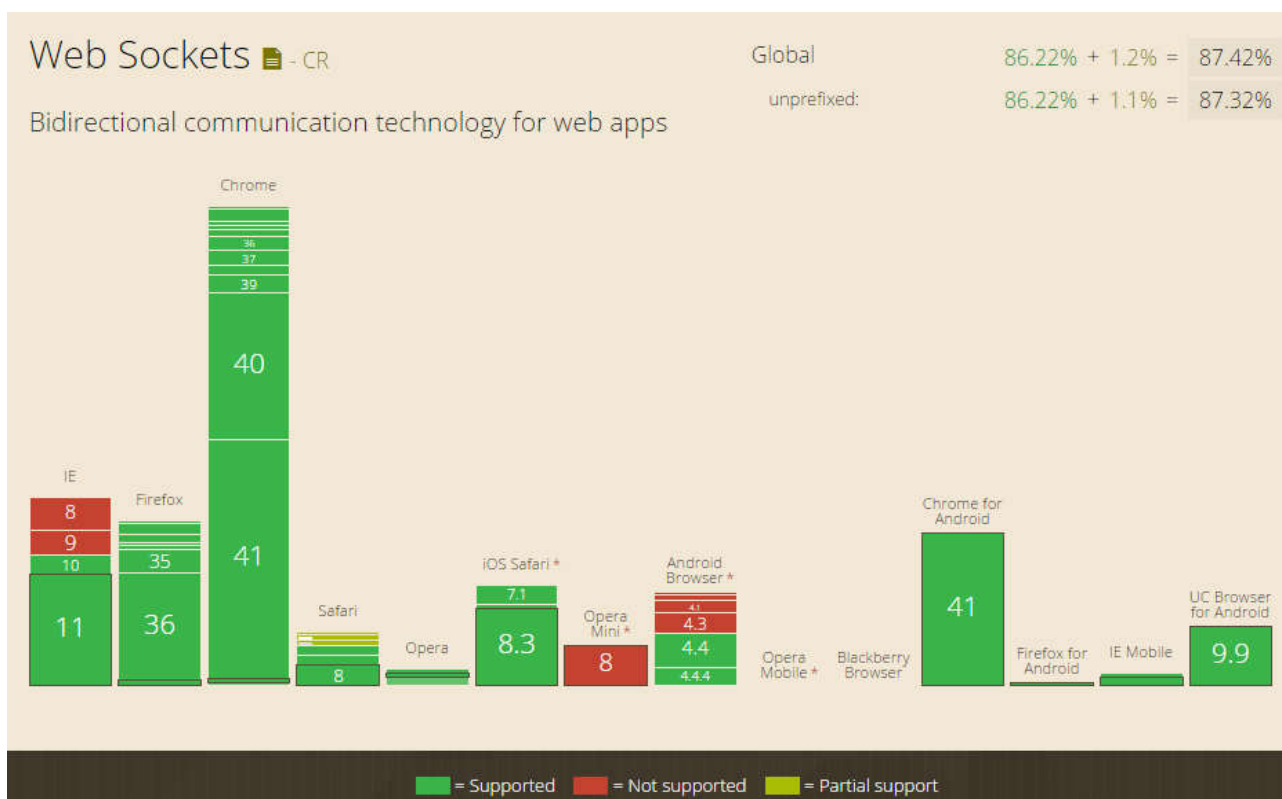


Рисунок 4.36 – Підтримка технології WebSocket різними браузерами

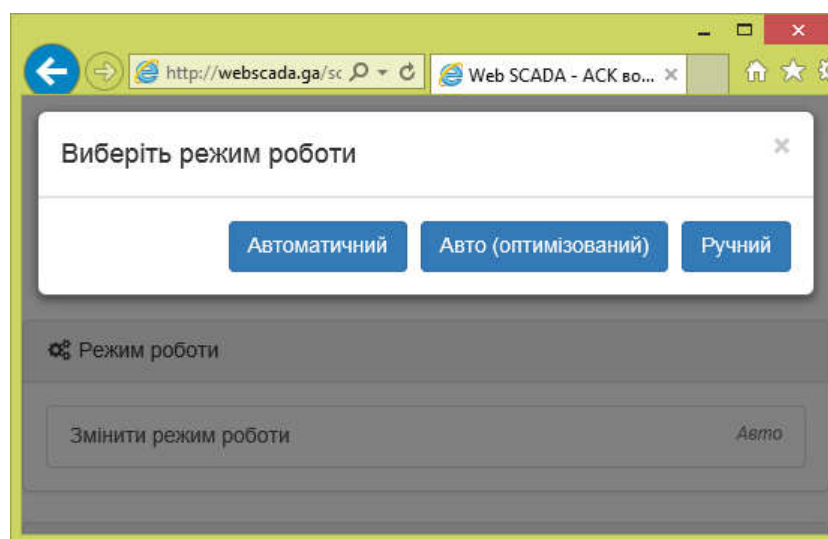


Рисунок 4.37 – Зміна режиму роботи АСК використовуючи браузер Internet Explorer 11

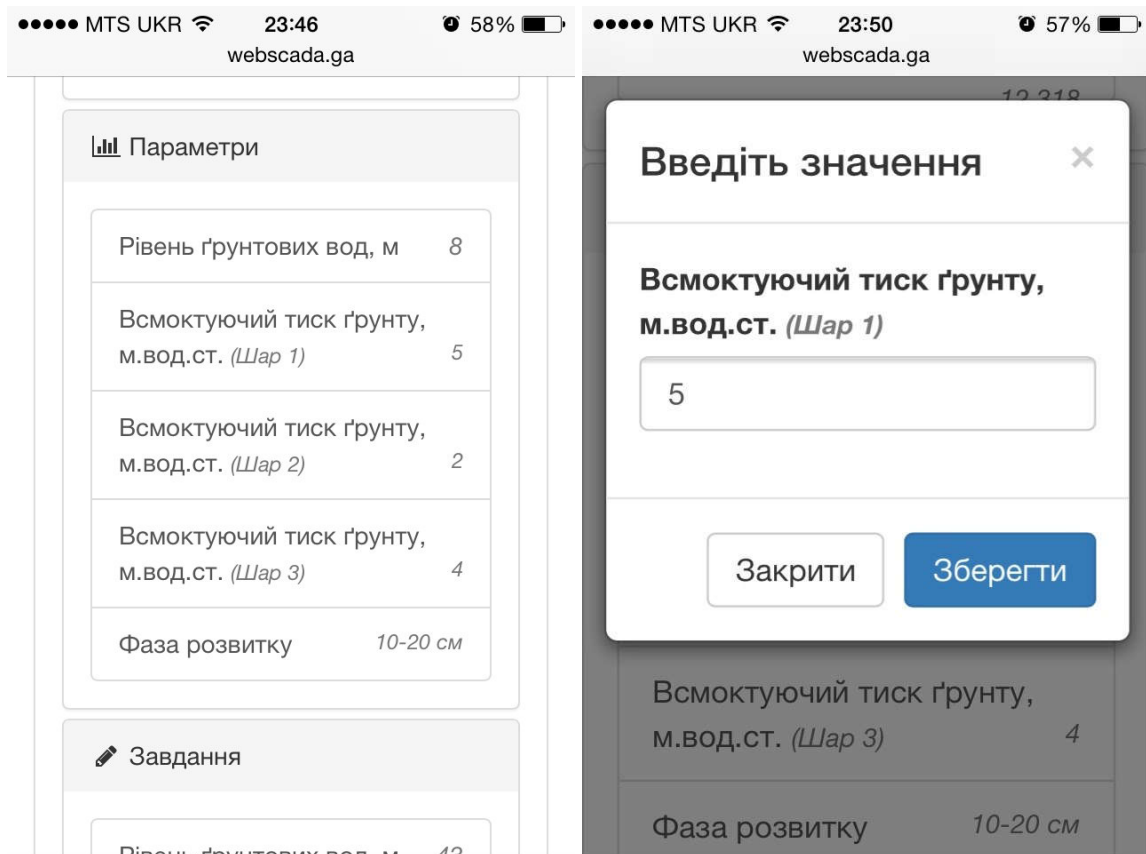


Рисунок 4.38 – Вигляд Web SCADA та вікно зміни всмоктуючого тиску в першому шарі ґрунту у браузері iOS Safari на iPhone 4s

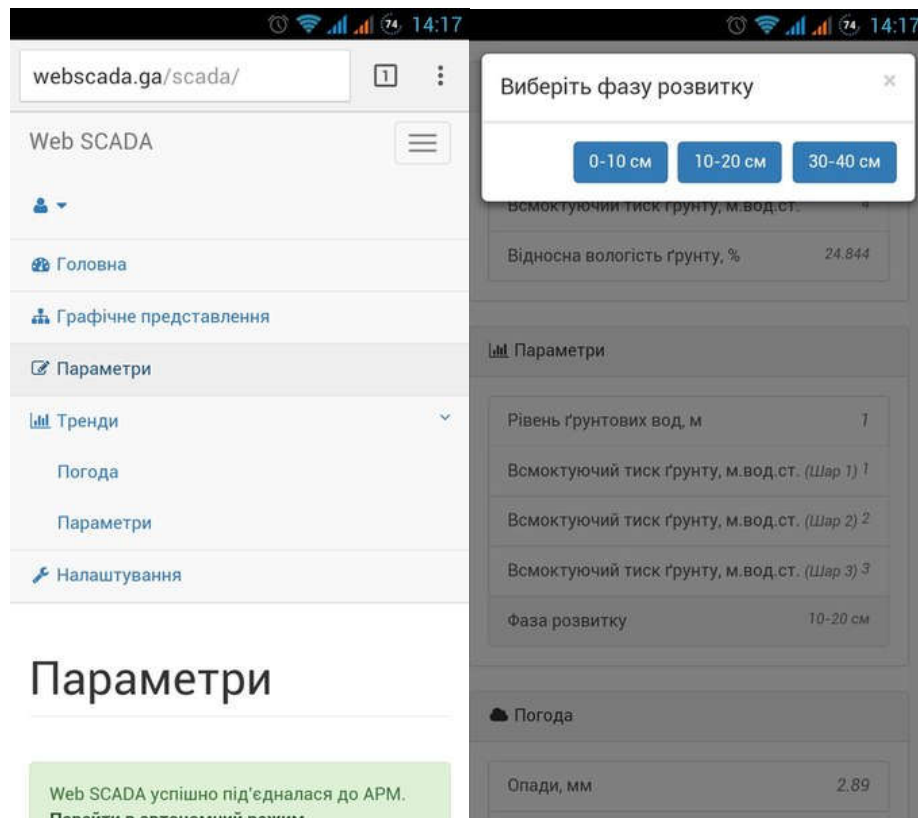


Рисунок 4.39 – Вигляд Web SCADA та вікно зміни фази розвитку у браузері Chrome під управлінням ОС Android 4.0.4

Впровадження даних моделей та методів керування проведено в Обухівському міжрайонному управлінні водного господарства. Розглянемо Обухівську ОЗС детальніше.

Підконтрольна ділянка розміщена в м. Обухів Київської обл. Кліматичний район міста помірно континентальний з м'якою зимою і теплим літом. Рельєф ділянки рівний. Склад ґрунту - суглинок. На землі вирощують багаторічні трави, овочеві та силосні культури. На ділянці присутнє місце під городництво. Вирощуються картопля, морква, капуста. Територія ділянки 1773 Га. Насосна станція с. Безрадичі (рис. 4.40) являється головною системою відкачки поверхневих вод в м. Обухові. Вона належить міжрайонному управлінню водного господарства. Справна робота насосів і агрегатів запобігає підтопленню м. Обухова та сільськогосподарських угідь, що знаходяться в області.

Опис процесу керування. Магістральний канал є основним елементом осушувальної системи. Найбільш відповідальна його ділянка – місце спряження з основним водоприймачем. Магістральний канал проходить по найнижчих ділянках території з нахилом до р. Стугна. Відкрита провідна (зволожувальна) мережа призначена для прийому надлишкових вод із регулюючої і огорожувальної мережі. За призначенням поділяється на міжгосподарську, обслуговуючу не менше 2-х господарств, і внутрішньогосподарську, обслуговуючою одне господарство. Провідна мережа в плані проектується з врахуванням рельєфа місцевості, можливості зволожувальних заходів, інженерно-геологічних умов тощо. Регулююча мережа застосовується для осушення сільськогосподарських угідь. Вона буває відкритою у вигляді відкритих каналів і закритою у вигляді колекторно-дренажної мережі. Довжина каналів - 100-1500 м, спряження каналів здійснюється під кутом 90° або близьких до нього. Огороджувальна мережа розміщується по границях об'єкта, де можливе надходження на осушувальні землі поверхневих і ґрунтових вод. Огороджувальні мережі є двох видів: ловчі та нагірні. На насосній станції

знаходяться три донні насоси М1...М3 типу ОПВ 2500 - 4.2. Зі сторони всмоктуючих насосів розташовані В1...В3 засувки ручного типу.

Характеристики насоса. Електронасос осьовий занурювальний призначений для перекачування води з рН від 6 до 10, температурою не вище +35 °С із загальною мінералізацією не більше 5000 мг/л, з водневим показником рН від 6 до 10, з вмістом механічних домішок не більше 6 г/л, з них абразивних не більше 1 г/л, хлоридів (хлор-іонів) не більше 800 мг/л, сульфатів (сульфат-іонів) не більше 1500 мг/л, сірководню не більше 10 мг/л.

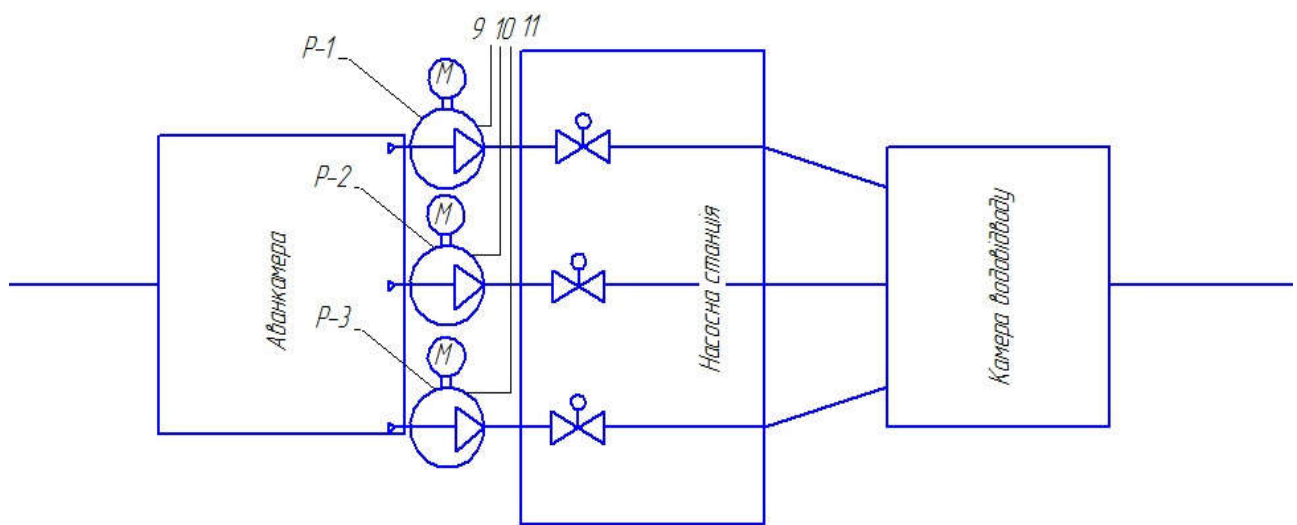


Рисунок 4.40 – Схема насосної станції

Електронасос осьовий занурювальний являє собою моноблочний агрегат з вбудованим двигуном. Спеціальний асинхронний двигун розташовується в герметичній капсулі з надлишковим тиском. Електронасос ОПВ 2500-4.2 встановлюється на санчатах і на шарнірі. Умовне позначення електронасоса при замовленні, листуванні і в іншій документації повинно містити типорозмір, кліматичне виконання і категорію розміщення по ГОСТ 15150 із зазначенням умовного позначення електронасоса.

Режим роботи насосної станції. Система управління насосної станції працює в ручному режимі. В ручному режимі станція управляється з поста оператора, куди надходить інформація про режим роботи станції, аварії в системі, працюючі насоси і стан засувок (відкрита або закрита). Живлення

шафи з електроустаткуванням здійснюється із зовнішньої сторони підведенням до клем А, В, С клемника ХТ1 трьох фаз напруги 380 В частотою 50 Гц, нульового дроту до клеми РЕ і дроту заземлення до клеми G. Клеми А, В і С підключаються до силового автоматичного вимикача QS1. Індикація наявності напруги всередині електрошафи здійснюється за допомогою лампи НL1, підключеної до однієї з фаз напруги живлення за силовим автоматичним вимикачем QS1. Вона сигналізує обслуговуючому персоналу про те, що внутрішні ланцюги електрошафи знаходяться під напругою.

Основні або робочі затвори служать для оперативного регулювання витрат і рівнів води, піднімаються та опускаються в поточній воді, тобто під напором. Ремонтні затвори використовуються для тимчасового перекриття вхідних отворів при ремонтах і оглядах основних затворів, а також насосів та іншого обладнання станції в цілому.

Розробка функціональної схеми автоматизації. Умовно ФСА розділено на вимірювальну та керуючу частину (додаток К). До вимірювальної частини належать давачі вологості ґрунту 1-1, 1-2, 1-3, давачі рівня ґрунтових вод 2-1, 2-2, 2-3, метеостанція. До керуючої частини належать мікроконтролер, АРМ, насоси М(1-3) відкачки води. На функціональній схемі автоматизації показана ділянка, на якій постійно в автоматичному режимі підтримується задана вологість ґрунту.

Опис роботи системи. АРМ у періодичному режимі проводить запит даних з давачів вологості ґрунту 1-1, 1-2, 1-3 та давачів рівня ґрунтових вод 2-1, 2-2, 2-3. Періодично АРМ здійснює перерахунок уставки РГВ на основі аналізу даних вологості, поточного значення РГВ та короткотермінового метеопрогнозу. Якщо необхідно підвищити значення РГВ, закривається шлюз на насосній станції та відкривається шлюз для подачі води з р. Сіверка, поки рівень ґрунтових вод не досягне рекомендованого значення. Якщо необхідно знизити РГВ, система вмикає насоси і починається відкачка води, поки її рівень не буде задовільним.

Наступні матеріали наукових і технічних розробок дисертаційної роботи впроваджені у роботу Обухівського міжрайонного управління водного господарства:

1. Структура автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні, що передбачає оперативне врахування зовнішніх стохастичних збурень, діючих на об'єкт керування.

2. Математична модель ненасиченої зони ґрунту на базі нейронних мереж, що дозволяє прогнозувати зміну вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в залежності від попередньої та поточної його вологості, рівня ґрунтових вод (РГВ), даних короткотермінового метеопрогнозу.

3. Метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахуванням виду сільськогосподарських культур, фази їх розвитку, а також впливу стохастичних збурюючих факторів, якими є погодні умови, на основі механізмів нечіткої логіки та нейронних мереж.

4. Програмне забезпечення керуючої частини автоматизованої системи керування вологістю ґрунту на основі мікропроцесорного регулятора.

5. Програмне забезпечення автоматизованого робочого місця оператора, яке дозволяє обраховувати завдання рівня ґрунтових вод на наступний керуючий період в залежності від попереднього та поточного значення РГВ, даних короткотермінового метеопрогнозу та задаючого значення вологості ґрунту у конкретному його шарі (шар ґрунту визначається фазою розвитку рослин, що показує глибину знаходження їх кореневої системи у ґрунті); відображати значення усіх технологічних параметрів (вологість або всмоктуючий тиск ґрунту, РГВ, дані метеопараметрів) у реальному часі; змінювати режим роботи системи керування (автоматичний-ручний); вести централізовану базу даних параметрів процесу; моделювати зміну вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в залежності від попередньої та поточної вологості ґрунту, рівня ґрунтових вод, даних короткотермінового

метеопрогнозу; зчитувати дані метеопрогнозу; при необхідності вводити значення технологічних параметрів вручну (за відсутності якогось із давачів).

6. Проект програмно-апаратної реалізації АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, який включає в себе перелік технічних засобів автоматизації для вимірювання технологічних параметрів, здійснення керуючих впливів, обрахунку завдання, організації візуалізації ходу процесу та зв'язку з оператором.

Вище вказані матеріали наукових і технічних розробок дисертаційної роботи забезпечують:

- можливість прогнозувати зміну вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в залежності від попередньої та поточної вологості ґрунту, рівня ґрунтових вод, даних короткотермінового метеопрогнозу; запропоноване автором використання нейронних мереж для моделювання дозволяє побудувати математичну модель ненасиченої зони будь-якого типу ґрунту на основі наявних експериментальних даних або даних багаторічних спостережень;

- можливість керування вологістю ґрунту, враховуючи вид вирощуваних культур, фази їх розвитку, а також вплив стохастичних збурюючих факторів, що дозволяє підвищити точність керування вологістю ґрунту, забезпечити отримання максимально можливих врожаїв сільськогосподарських культур, економити водні та енергетичні ресурси за рахунок їх раціонального використання;

- можливість обраховувати завдання рівня ґрунтових вод на наступний керуючий період з врахуванням попереднього та поточного значення РГВ, даних короткотермінового метеопрогнозу, задаючого значення вологості ґрунту у конкретному його шарі, який визначається видом сільськогосподарської культури та фазою її розвитку;

- надання відомостей оператору про значення усіх технологічних параметрів (вологість або всмоктуючий тиск ґрунту, РГВ, дані метеопараметрів) у реальному часі, можливість змінювати режим роботи з

автоматичного на ручний дистанційний і навпаки, при необхідності вводити значення технологічних параметрів вручну;

- ведення бази даних технологічних параметрів з метою її подальшого використання для перенавчання нейронних мереж, які використовуються для прогнозування вологості у ненасиченій зоні ґрунту та керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, з метою підвищення точності їх роботи.

Для моделювання ненасиченої зони ґрунту сформуємо навчальну і тестувальну вибірки даних за різні вегетаційні періоди. На основі нео-фаззи нейрона (2.3) для різних шарів ґрунту (0-10, 10-20 та 30-40 см) використаємо моделі, розроблені у розділі 2:

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h)$$

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), рівень ґрунтових вод L від світлової поверхні (м); вихідним параметром є всмоктуючий тиск W^h (м) у визначеному шарі ґрунту h ; $NN()$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок.

Для навчання нейронних мереж сформовано базу даних за 2009-2010 роки у період з 1 квітня по 31 жовтня. Тестувальна вибірка даних сформована за період з 1 квітня по 31 жовтня 2011 року. Погодні умови та дані всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту за період з 1 квітня по 31 жовтня 2009-2011 рр. наведено у додатку Л. Програмне забезпечення для навчання та тестування нейронних мереж розроблено мовою C++. Вікно форми програми наведено на рис. 4.41. Результати роботи нео-фаззи моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту на Обухівській ОЗС наведено у таблиці 4.1.

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззи мережі для прогнозування всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=0-10$ см:

$wP = 0.06209; 0.05787; 0.05572; 0.05877; 0.008028; 0;$
 $wD = -0.1106; -0.07549; -0.03936; -0.002056; 0.04178; 0;$
 $wL = 0; 0.43; 0.3475; 0.2251; 0.1065; 0;$
 $wW1 = 0.02943; 0.1372; 0.1259; 0.1234; 0.1155; 0;$
 $wW2 = 0.01411; 0.08727; 0.1211; 0.1347; 0.1743; 0.$

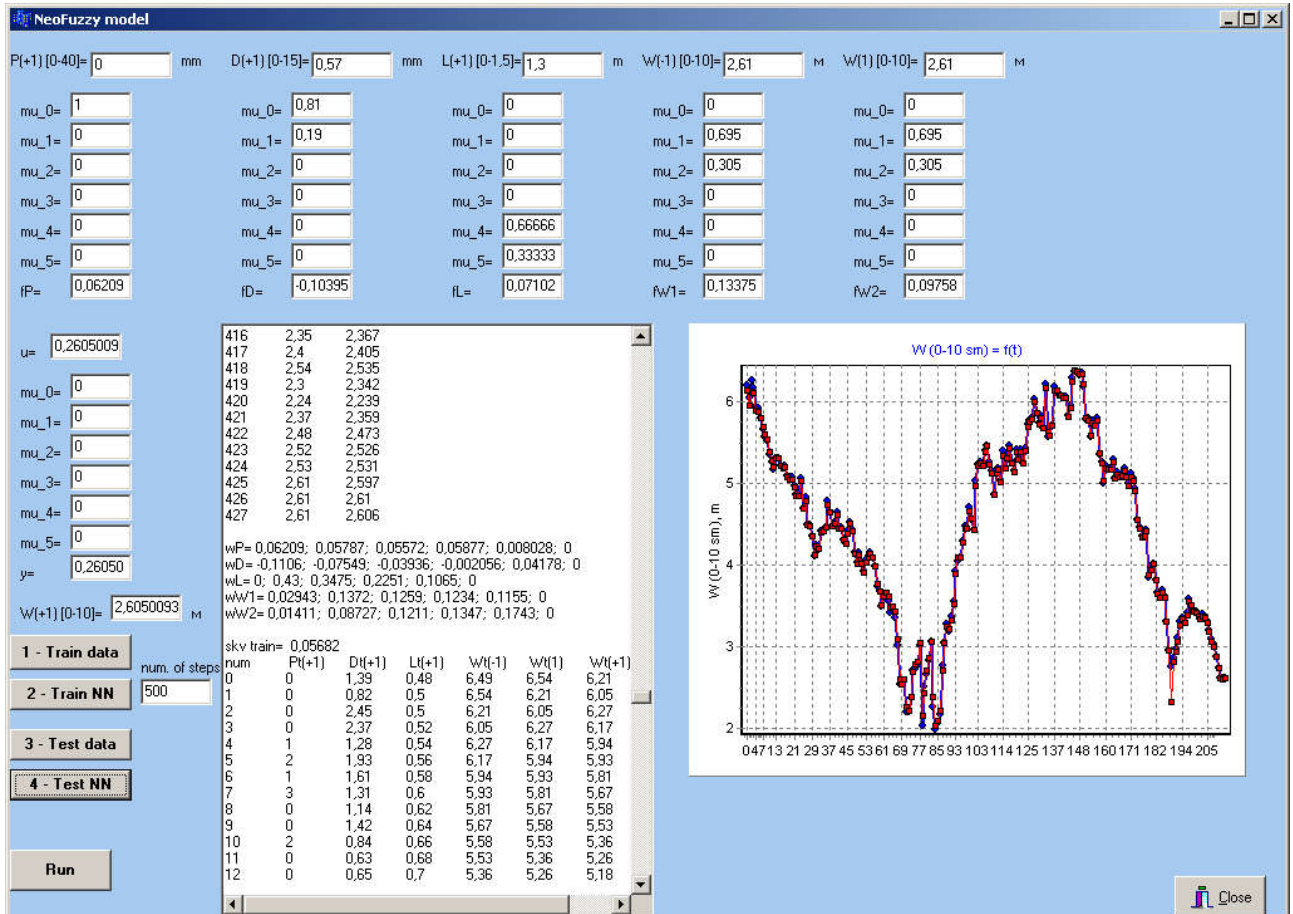


Рисунок 4.41 – Вікно форми програми навчання і тестування нео-фаззі моделей

Таблиця 4.1 – Результати роботи нео-фаззі моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту на Обухівській ОЗС

| Шар ґрунту | Кількість точок | | Середньоквадратичне відхилення, м вод. ст. | |
|------------|-----------------|------------|--------------------------------------------|------------|
| | навчання | тестування | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 428 | 214 | 0.05682 | 0.03125 |
| h=10-20 см | | | 0.03207 | 0.01649 |
| h=30-40 см | | | 0.01108 | 0.008316 |

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=10-20$ см:

$w_P = 0.04632; 0.04272; 0.03993; 0.04028; 0.005423; 0;$

$w_D = -0.07671; -0.05233; -0.02763; -0.003422; 0.02572; 0;$

$w_L = 0; 0.2497; 0.2028; 0.1346; 0.06718; 0;$

$w_{W1} = 0; 0.1265; 0.1211; 0.1126; 0; 0;$

$w_{W2} = 0; 0.1012; 0.1166; 0.1423; 0; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=30-40$ см:

$w_P = 0.07705; 0.07031; 0.06383; 0.06152; 0.007005; 0;$

$w_D = -0.01393; -0.008642; -0.00436; -8.845E-5; 0.006169; 0;$

$w_L = 0; -0.125; -0.09306; -0.06347; -0.03153; 0;$

$w_{W1} = 0.09019; 0.09575; 0.09378; 0; 0; 0;$

$w_{W2} = 0.06587; 0.09492; 0.1189; 0; 0; 0.$

Виконаємо розрахунок для перевірки адекватності отриманих моделей. Для цього виконаємо розрахунок F-критерію Фішера у програмі Microsoft Excel при рівні значимості $\alpha = 0.05$. Для моделей визначення всмоктуючого тиску у всіх трьох шарах ґрунту виконується нерівність $F_{емп.} < F_{кр.}$ як при навчанні, так і при тестуванні моделей (таблиці 4.2-4.4). Тому нульова гіпотеза про рівність генеральних дисперсій на рівні значимості 0.05 приймається, і розроблені моделі є адекватними. Графіки результатів роботи нео-фаззі моделей на незалежних тестувальних вибірках даних для прогнозуванні всмоктуючого тиску ґрунту у різних шарах ґрунту на рис. 4.42.

На основі нео-фаззі нейрона (2.3) для визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту (0-10, 10-20 та 30-40 см) використаємо нейрорегулятори, розроблені у розділі 3, результати роботи яких наведено у таблиці 4.5:

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h),$$

Таблиця 4.2 – Нео-фаззі модель визначення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 0-10 см на Обухівській ОЗС

| Показник | W(+1) | Wneuro(+1)_train | Wt(+1) | Wneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 4.273 | 4.261 | 4.467 | 4.457 |
| Дисперсія | 1.705 | 1.686 | 1.302 | 1.285 |
| Спостереження | 428.000 | 428.000 | 214.000 | 214.000 |
| df | 427.000 | 427.000 | 213.000 | 213.000 |
| F | 1.011 | | 1.013 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.456 | | 0.461 | |
| F критичне | 1.173 | | 1.253 | |

Таблиця 4.3 – Нео-фаззі модель визначення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 10-20 см на Обухівській ОЗС

| Показник | W(+1) | Wneuro(+1)_train | Wt(+1) | Wneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 3.466 | 3.460 | 3.573 | 3.568 |
| Дисперсія | 0.555 | 0.551 | 0.424 | 0.424 |
| Спостереження | 428.000 | 428.000 | 214.000 | 214.000 |
| df | 427.000 | 427.000 | 213.000 | 213.000 |
| F | 1.007 | | 1.002 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.470 | | 0.495 | |
| F критичне | 1.173 | | 1.253 | |

Таблиця 4.4 – Нео-фаззі модель визначення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 30-40 см на Обухівській ОЗС

| Показник | W(+1) | Wneuro(+1)_train | Wt(+1) | Wneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 2.112 | 2.115 | 2.050 | 2.052 |
| Дисперсія | 0.115 | 0.114 | 0.095 | 0.094 |
| Спостереження | 428.000 | 428.000 | 214.000 | 214.000 |
| df | 427.000 | 427.000 | 213.000 | 213.000 |
| F | 1.007 | | 1.007 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.471 | | 0.479 | |
| F критичне | 1.173 | | 1.253 | |

Таблиця 4.5 – Результати роботи нео-фаззі регуляторів для визначення РГВ на Обухівській ОЗС

| Шар ґрунту | Кількість точок | | Середньоквадратичне відхилення, м | |
|------------|-----------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | навчання | тестування | навчання | тестування |
| h=0-10 см | 428 | 214 | 0.02429 | 0.005832 |
| h=10-20 см | | | 0.01487 | 0.004278 |
| h=30-40 см | | | 0.01033 | 0.005748 |

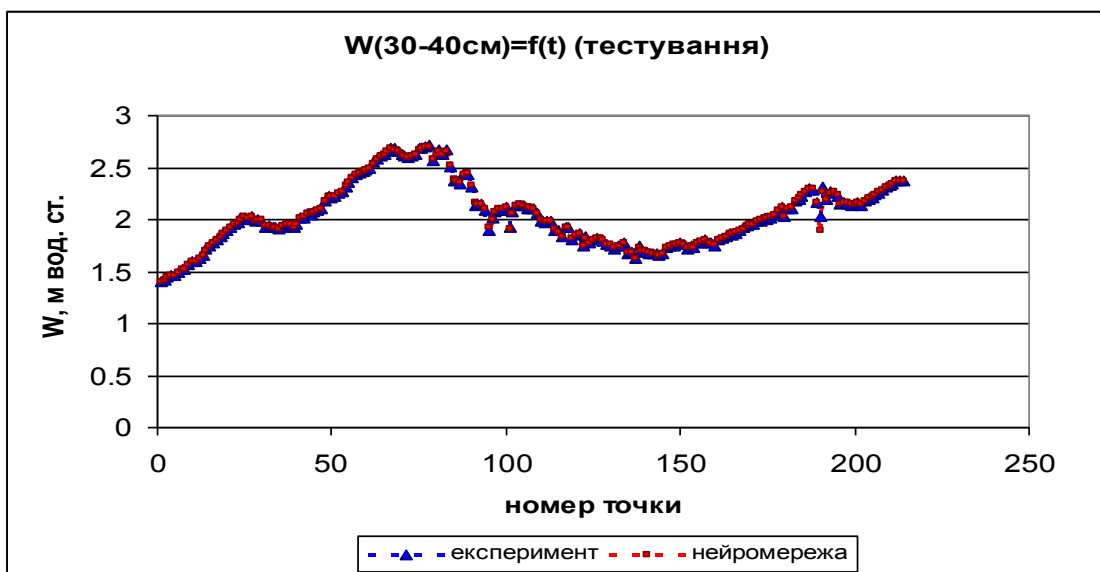
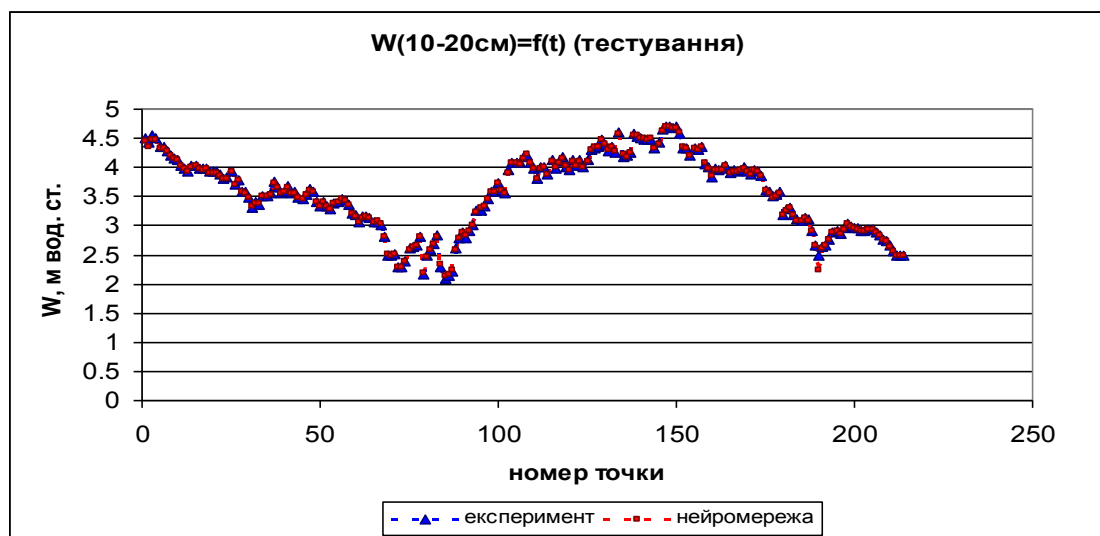
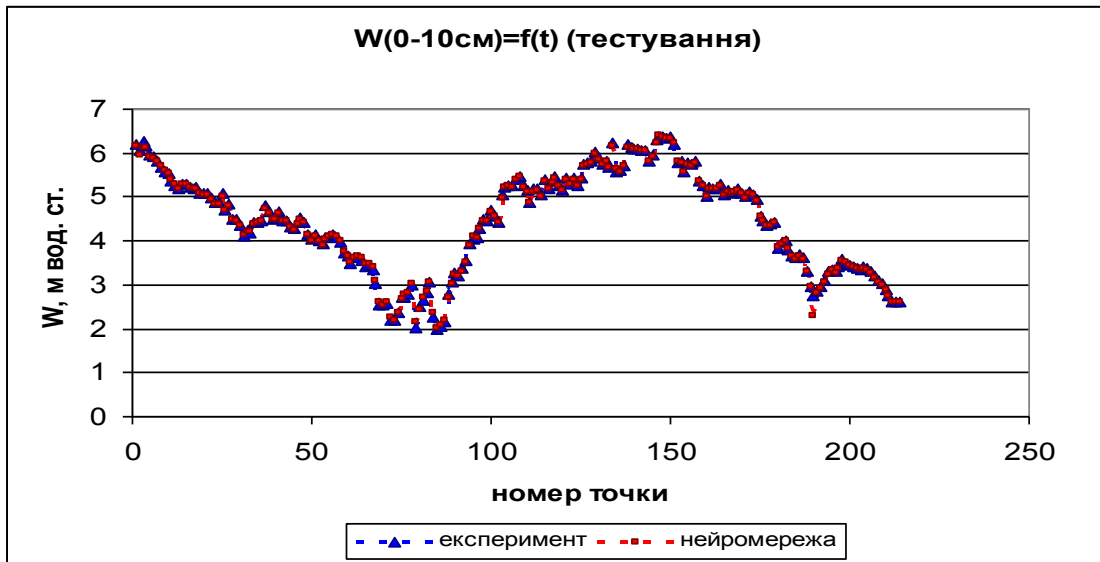


Рисунок 4.42 – Результати роботи нео-фаззі моделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту у різних шарах (0-10 см, 10-20 см, 30-40 см): 1 – експериментальні дані, 2 – результати роботи нейромережі

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), всмоктуючий тиск W^h (м) у визначеному шарі ґрунту h . Вихідним параметром є рівень ґрунтових вод L від світлової поверхні (м). $NN(\)$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок. Програмне забезпечення для навчання та тестування нейронних мереж розроблено мовою C++. Вікно форми програми наведено на рис. 4.43.

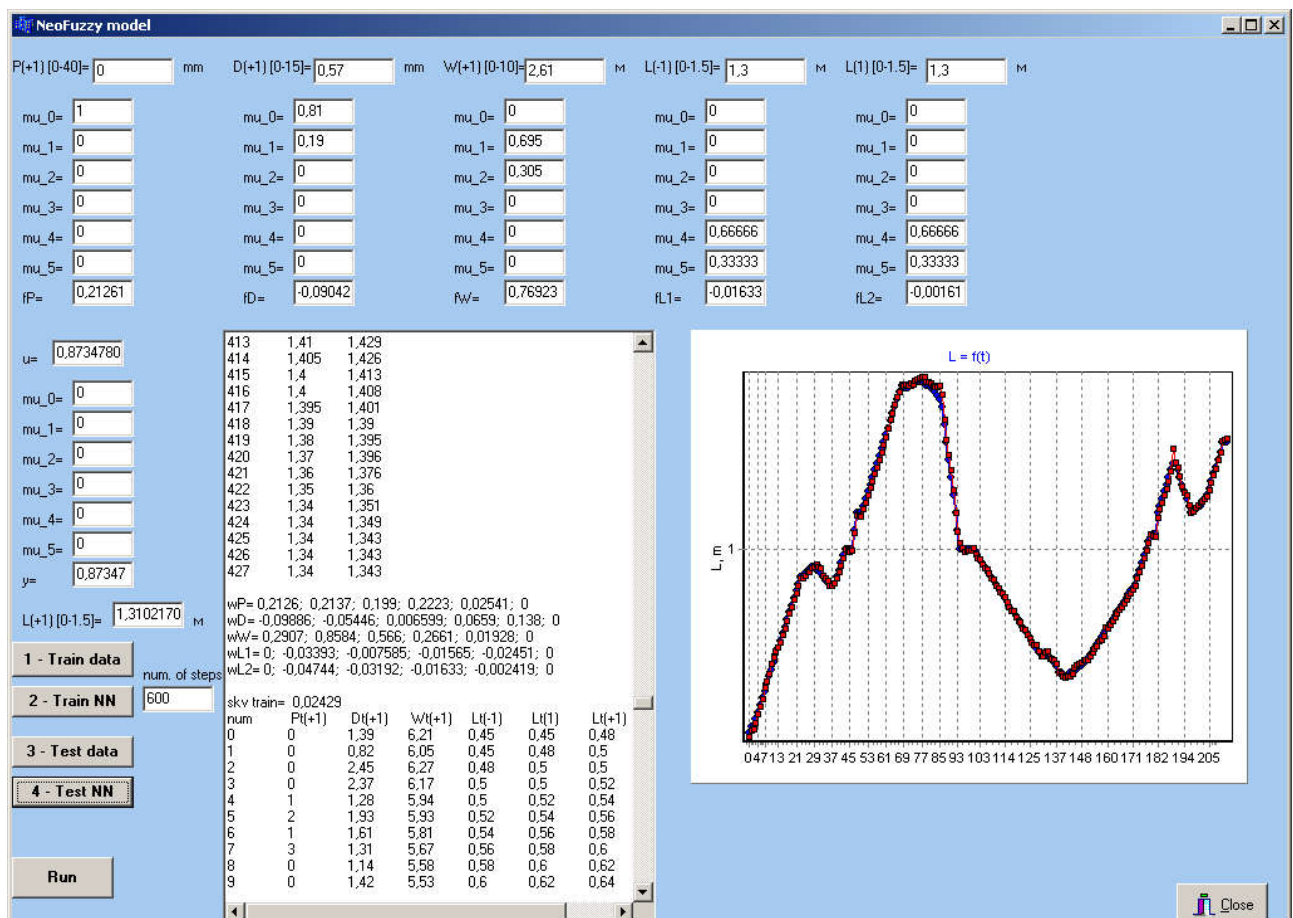


Рисунок 4.43 – Вікно форми програми навчання і тестування нео-фаззі регуляторів

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі регулятора для визначення уставки РГВ для підтримування необхідного всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=0-10$ см:

$wP= 0.2126; 0.2137; 0.199; 0.2223; 0.02541; 0;$

$wD= -0.09886; -0.05446; 0.006599; 0.0659; 0.138; 0;$

$wW = 0.2907; 0.8584; 0.566; 0.2661; 0.01928; 0;$
 $wL1 = 0; -0.03393; -0.007585; -0.01565; -0.02451; 0;$
 $wL2 = 0; -0.04744; -0.03192; -0.01633; -0.002419; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі регулятора для визначення уставки РГВ для підтримування необхідного всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=10-20$ см:

$wP = 0.1714; 0.1614; 0.1515; 0.1632; 0.01782; 0;$
 $wD = -0.1961; -0.1268; -0.06025; 0.008318; 0.08647; 0;$
 $wW = 0; 1.015; 0.4894; -0.007732; 0; 0;$
 $wL1 = 0; -0.03564; -0.004181; -0.009007; -0.02112; 0;$
 $wL2 = 0; -0.04655; -0.03392; -0.01541; 0.00967; 0.$

Розраховані вагові коефіцієнти для нео-фаззі регулятора для визначення уставки РГВ для підтримування необхідного всмоктуючого тиску у шарі ґрунту $h=30-40$ см:

$wP = -0.07426; -0.04709; -0.01118; 0.03001; 0.004562; 0;$
 $wD = 0.1457; 0.128; 0.1025; 0.08354; 0.0614; 0;$
 $wW = -0.3001; 0.6719; 1.504; 0; 0; 0;$
 $wL1 = 0; -0.04856; -0.006208; 0.003056; -0.02611; 0;$
 $wL2 = 0; -0.1015; -0.1119; -0.09951; -0.02368; 0.$

Виконаємо розрахунок для перевірки адекватності отриманих моделей. Для цього виконаємо розрахунок F-критерію Фішера у програмі Microsoft Excel при рівні значимості $\alpha = 0.05$. Для моделей визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску у всіх трьох шарах ґрунту виконується нерівність $F_{емп.} < F_{кр.}$ як при навчанні, так і при тестуванні моделей (таблиці 4.6-4.8). Тому нульова гіпотеза про рівність генеральних дисперсій на рівні значимості 0.05 приймається, і розроблені моделі є адекватними. Графіки результатів роботи нео-фаззі регуляторів на незалежних тестувальних вибірках даних для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту наведено на рис. 4.44.

Таблиця 4.6 – Нео-фаззі модель визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 0-10 см на Обухівській ОЗС

| Показник | L(+1) | Lneuro(+1)_train | Lt(+1) | Lneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 1.029 | 1.026 | 0.983 | 0.983 |
| Дисперсія | 0.080 | 0.079 | 0.065 | 0.066 |
| Спостереження | 428.000 | 428.000 | 214.000 | 214.000 |
| df | 427.000 | 427.000 | 213.000 | 213.000 |
| F | 1.006 | | 1.001 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.474 | | 0.447 | |
| F критичне | 1.173 | | 1.253 | |

Таблиця 4.7 – Нео-фаззі модель визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 10-20 см на Обухівській ОЗС

| Показник | L(+1) | Lneuro(+1)_train | Lt(+1) | Lneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 1.029 | 1.029 | 0.983 | 0.984 |
| Дисперсія | 0.080 | 0.079 | 0.065 | 0.065 |
| Спостереження | 428.000 | 428.000 | 214.000 | 214.000 |
| df | 427.000 | 427.000 | 213.000 | 213.000 |
| F | 1.006 | | 1.001 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.475 | | 0.500 | |
| F критичне | 1.173 | | 1.253 | |

Таблиця 4.8 – Нео-фаззі модель визначення РГВ для забезпечення необхідного всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 30-40 см на Обухівській ОЗС

| Показник | L(+1) | Lneuro(+1)_train | Lt(+1) | Lneuro_test(+1) |
|----------------------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Середнє | 1.029 | 1.029 | 0.983 | 0.983 |
| Дисперсія | 0.080 | 0.079 | 0.065 | 0.066 |
| Спостереження | 428.000 | 428.000 | 214.000 | 214.000 |
| df | 427.000 | 427.000 | 213.000 | 213.000 |
| F | 1.009 | | 1.006 | |
| P(F<=f) одностороннє | 0.464 | | 0.483 | |
| F критичне | 1.173 | | 1.253 | |

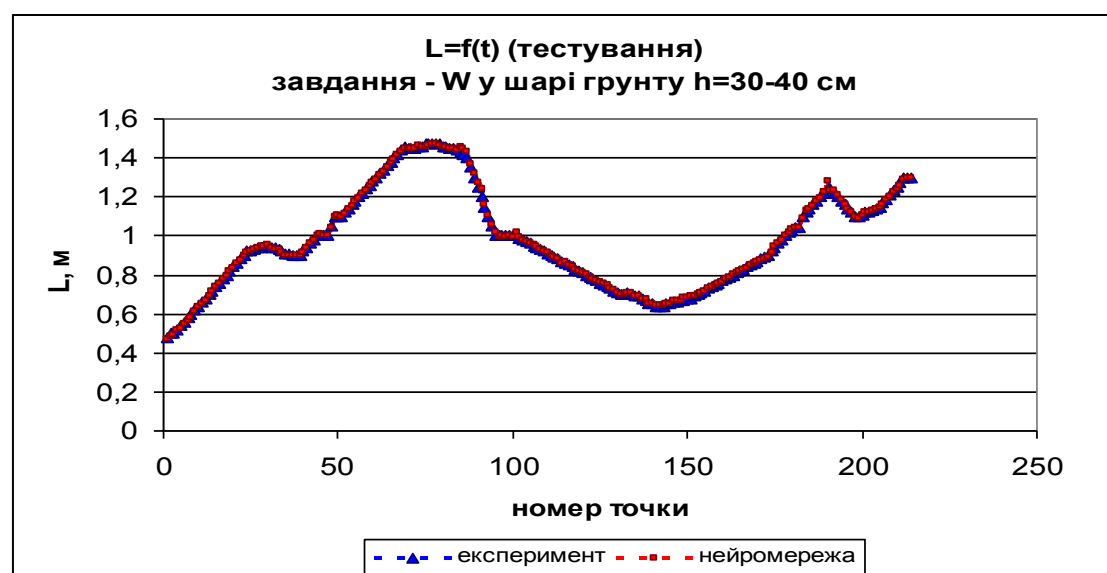
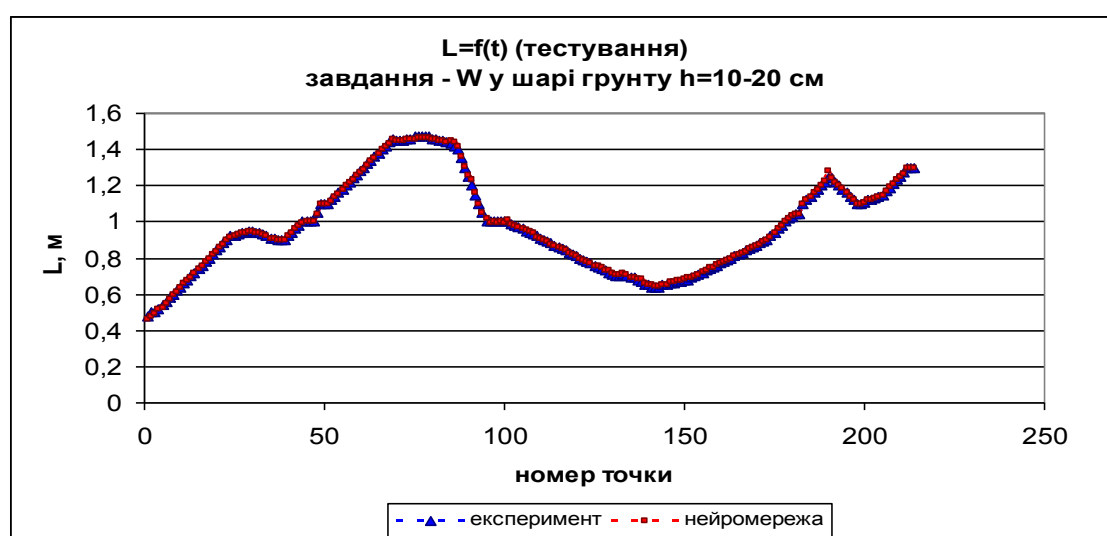
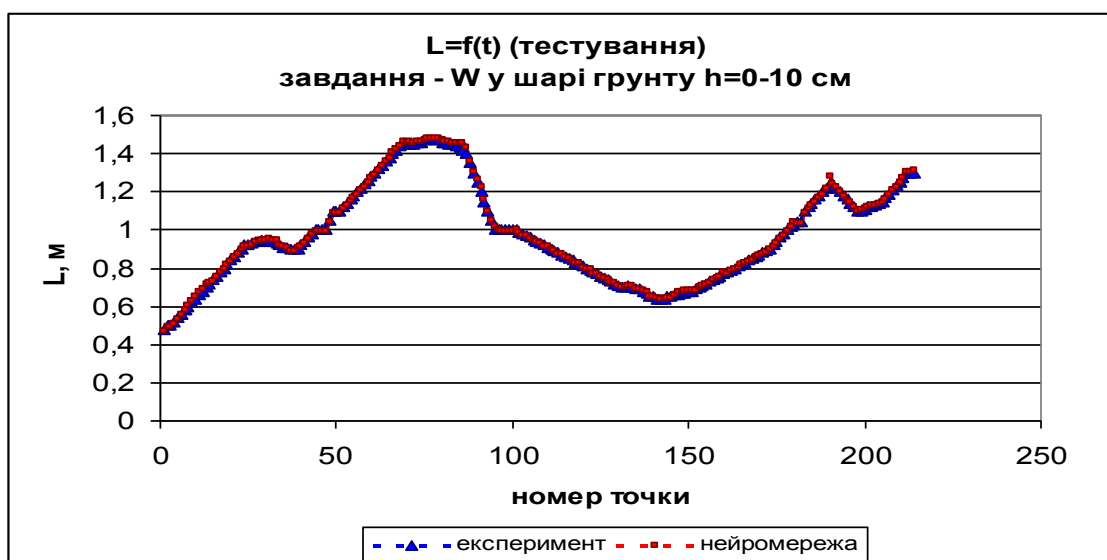


Рисунок 4.44 – Результати тестування нео-фаззі мереж для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у різних шарах (0-10 см, 10-20 см, 30-40 см): 1 – експериментальні дані, 2 – результати роботи нейромережі

Отже, розроблені нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску та для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту для Обухівської ОЗС забезпечують достатню точність роботи і можуть використовуватися у складі АРМ диспетчера. Адекватність розроблених моделей перевірена за допомогою F-критерію Фішера.

4.4 Основні результати і висновки до розділу

1. У даному розділі розроблено апаратну частину автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, яка складається із таких структурних одиниць: гідравлічний регулятор, вимірювальна станція, АРМ диспетчера ОЗС на базі ПК, переносний пульт керування, блок дискретних силових виходів для керування електромагнітними клапанами гідравлічного регулятора, блок контролю напруги, давачі технологічних параметрів.

2. Роботу АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні передбачено у наступних режимах: автоматичний, автоматичний водо- та енергозберігаючий, ручний дистанційний, ручний за місцем. Згідно цих вимог розроблено програмне забезпечення для всіх вузлів системи керування.

3. Матеріали наукових і технічних розробок дисертаційної роботи впроваджено в Обухівському міжрайонному управлінні водного господарства. Показана можливість адаптації розроблених моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур до різних ОЗС з підґрунтовим зволоженням.

4. Розроблено програмне забезпечення для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та керування вологозабезпеченістю на базі нео-фаззі мереж. Дане ПЗ є універсальним і може використовуватися для різних ОЗС з підґрунтовим зволоженням. Для переналаштування на іншу ОЗС достатньо замінити текстові файли з навчальними і тестувальними даними, сама програма при цьому лишається незмінною.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу, метою якої є розробка моделей і методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на ОЗС з підґрунтовим зволоженням для підвищення ефективності функціонування цих систем та забезпечення отримання гарантованих врожаїв сільськогосподарських культур з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів. Основними результатами, отриманими в результаті виконання дисертаційної роботи є:

1. Проаналізовано існуючі методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на ОЗС з підґрунтовим зволоженням, виділено переваги і недоліки таких систем.

2. Розроблено каскадно-комбіновану структурну схему автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні за допомогою зміни рівня ґрунтових вод.

3. Розроблено нові прогнозуючі математичні моделі вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту на основі статичних багат шарових нейронних мереж прямого розповсюдження різної архітектури та нео-фаззі мереж, виконано їх порівняльний аналіз. Проведено математичне моделювання процесу вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту на базі диференціального рівняння методом Ньютона-Рафсона, розроблено математичну модель колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту. Побудовані нейромоделі можуть використовуватися для перевірки ефективності роботи різних методів керування, а також у складі АРМ диспетчера ОЗС і служити зручним інструментом для планування і керування режимами зволоження сільськогосподарських культур.

4. Розроблено новий метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі статичних багат шарових нейронних мереж прямого розповсюдження, що дозволило підвищити точність його визначення у порівнянні із використанням емпіричних формул.

5. Розроблено нові методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням дії збурень на основі статичних багат шарових нейронних мереж прямого розповсюдження різної архітектури та нео-фаззі мереж, що дозволило підвищити точність керування вологістю ґрунту шляхом оперативного врахування впливу збурень.

6. Вперше застосовано інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, що дозволило економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю. Проведено моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, досліджено її динамічні властивості.

7. Розроблено новий метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки з врахуванням впливу випадкових збурень на об'єкт.

8. Удосконалено структуру гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії, в яку введено додаткові електромагнітні клапани, давачі рівня води, кількості опадів, температури та відносної вологості повітря, швидкості вітру та мікропроцесорний блок керування, обладнаний безпроводним інтерфейсом зв'язку, що дозволило підвищити швидкодію роботи та опрацювання інформації, точність керування вологістю кореневого шару ґрунту.

9. Розроблено програмне забезпечення для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на базі нео-фаззі мереж. Дане ПЗ є універсальним і може використовуватися для різних ОЗС з підґрунтовим зволоженням. Для переналаштування на іншу ОЗС достатньо замінити текстові файли з навчальними і тестувальними даними, сама програма при цьому лишається незмінною.

10. Розроблено апаратну частину автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю, яка складається із таких структурних одиниць: гідравлічний регулятор, вимірювальна станція, АРМ диспетчера ОЗС на базі ПК, переносний пульт керування, блок дискретних силових виходів для керування електромагнітними клапанами гідравлічного регулятора, блок контролю напруги, датчі технологічних параметрів. Роботу АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні передбачено у наступних режимах: автоматичний, автоматичний водо- та енергозберігаючий, ручний дистанційний, ручний за місцем. Згідно цих вимог розроблено програмне забезпечення для всіх вузлів системи керування.

11. Матеріали наукових і технічних розробок дисертаційної роботи впроваджено в Обухівському міжрайонному управлінні водного господарства. Показана можливість адаптації розроблених моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур до різних ОЗС з підґрунтовим зволоженням. Результати дисертаційних досліджень використовуються також у навчальному процесі при підготовці фахівців з напрямку 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» та спеціальності 7.05020201, 8.05020201 «Автоматизоване управління технологічними процесами» у Національному університеті водного господарства та природокористування, м. Рівне, у НДР студентів, підготовці дипломних проектів та магістерських робіт.

Введення автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю на основі сучасних ТЗА, інтелектуальних методів керування, використання централізованого пункту збору даних та керування дозволяє: забезпечити задану точність керування з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів; отримання планових врожаїв сільськогосподарських культур; вести централізовану базу даних технологічних параметрів; функціонування системи керування у різних режимах: автоматичному, ручному дистанційному, ручному за місцем; покращити умови праці обслуговуючого персоналу; підвищити ефективність та надійність роботи ОЗС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атлас почв СССР. – Москва: Колос, 1974. – 164 с.
2. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – Москва: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
3. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2005. – 367 с.
4. Борисов В.В. Нечёткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
5. Бочаров С.Ю. Автоматизация водорегулирующих комплексов / С.Ю. Бочаров. – Ровно: Издательство РГТУ, 2000. – 110 с.
6. Гребеннік І.В. Методи прийняття рішень / О.Г. Наконечний, І.В. Гребеннік, Т.Є. Романова, А.Д. Тевяшев. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 132 с.
7. Гушля А.В. Водно-балансовые исследования / А.В. Гушля, В.С. Мезенцев. - Киев: Вища школа, 1982.
8. Дмитриев А.Ф. Деформационные процессы в несвязных грунтах в придренированной зоне и их влияние на работу осушительно-увлажнительных систем: Монография / А.Ф. Дмитриев, Н.Н. Хлапук, Д.А. Дмитриев. – Ровно: Издательство РГТУ, 2002. – 145 с.
9. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б.И. Копылова. – Москва: Лаборатория Базовых знаний, 2004. – 832 с.
10. Дренаж сельскохозяйственных земель / [Пер. с англ.]. – Москва: Колос, 1964. – 719 с.
11. Землеробство на осушенных землях / [М.Г. Цюпа, В.С. Бистріцький, І.Т. Слюсар та ін.]; за ред. М.Г. Цюпи. – К: Урожай, 1990. – 184 с.
12. Коваленко П.И. Автоматизация мелиоративных систем / П.И. Коваленко.– М.: Колос, 1983. – 304с.

13. Коваленко П.И. Реконструкция мелиоративных систем / П.И. Коваленко, Б.И. Чалый, А.И. Тыщенко. – К.: Урожай, 1991. – 168 с.
14. Ковальчук П.І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища / П.І. Ковальчук. – К.: Либідь, 2003. – 208 с.
15. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2003. – 93 с.
16. Костяков А.Н. Избранные труды. Том первый / А.Н. Костяков. – М.: Госуд. издательство сельхоз. литературы, 1961. – 807 с.
17. Костяков А.Н. Основы мелиорации / А.Н. Костяков. – М.: Сельхозиздат, 1960. – 622 с.
18. Круглов В.В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – Москва, 2001. – 221 с.
19. Лазарчук М.О. Оптимізація розрахунку осушувальних систем та управління ними: монографія / М. О. Лазарчук, А. В. Черенков, А. М. Рокочинський, В. П. Гаврищак, С. В. Грицан, В. М. Гус, А. Г. Ліщинський, Т. М. Микитин, В. Г. Муранов, В. П. Окорський; Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. - Рівне, 2010. - 354 с.
20. Лазарчук М.О. Основы гидромелиораций. Осушения земель. / М.О. Лазарчук. – Рівне: НУВГП, 2006. – 300 с.
21. Леоненков А. Нечёткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Леоненков. – Санкт Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 719 с.
22. Лукнер Л. Моделирование геофильтрации /Л. Лукнер, В.М. Шестаков. – Москва: Недра, 1976. – 407 с.
23. Маслов Б.С. Справочник по мелиорации / Б.С. Маслов, И.В. Минаев, К.В. Губер. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 384 с.
24. Маслов Б.С. Осушительно-увлажнительные системы / Б.С. Маслов, В.С. Станкевич, В.Я. Черненко. – М.: Колос, 1981. – 280 с.
25. Матус С.К. Патент на корисну модель №8038. Тензіометр з автоматичною дозаправкою. / С.К. Матус, В.Й. Пастушенко. – Бюлетень

№ 7 2005 р.

26. Матус С.К. Удосконалення водорегулювання на автоматизованих осушувально-зволожувальних системах з урахуванням рельєфної диференціації території: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Матус Світлана Костянтинівна. – Рівне, 2013. – 208 с.
27. Медведев В.С. Нейронные сети. Matlab 6. / В.С. Медведев, В.Г. Потёмкин. – Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
28. Мелиорация и водное хозяйство. 3. Осушение: Справочник / [Под ред. Б.С. Маслова]. – М.: Агропромиздат, 1985. – 447 с.
29. Муромцев Н.А. Мелиоративная гидрофизика почв. Методы исследования, гидрофизические закономерности, регулирование водного режима почв и растений / Н.А. Муромцев. – Ленинград: Ленинград гидрометеоиздат, 1991. – 271 с.
30. Науково-методичні та організаційні засади управління водогосподарсько-меліоративними об'єктами гумідної зони України за короткотерміновим метеорологічним прогнозом. Методичні рекомендації. / А.М. Рокочинський, Я.Я. Зубик, Л.В. Зубик, Є.І. Покладньов; за участю спеціалістів Держводгоспу України В.А. Сташук, В.Д. Крученюк. – Рівне: НУВГП, 2005. – 53 с.
31. Наумчук О.М. Удосконалення процесів водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах засобами гідравлічної автоматизації: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Наумчук Олександр Миколайович. – Рівне, 2007. – 218 с.
32. Орошаемый участок с предварительным осушением Ровенской областной сельскохозяйственной опытной станции в с. Шубков Ровенского района, Ровенской области. Проект. – Ровно: филиал Укргипроводхоза, 1976. – Т. I. – 96 с.
33. Пастушенко В.И. Обоснование параметров циклического увлажнения из закрытого дренажа и средства управления для его реализации: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Пастушенко Владимир Иосифович. –

Ровно, 1985. – 307 с.

34. Пастушенко В.Й. Розрахунок динаміки управляючої дії при циклічному зволоженні / В.Й. Пастушенко, Б.П. Сидорчук, О.М. Наумчук. // Вісник РДТУ. – Рівне, 1999. – Випуск 2. Частина 1. – С. 186-190.
35. Пастушенко В.Й. Управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських рослин при підґрунтовому зволоженні на основі нечіткої логіки / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко. - Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. – Рівне, 2007. - Випуск 4 (40). Частина 1. – С. 342-349.
36. Пастушенко В.Й. Автоматизована система управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Вісник Інженерної Академії Наук України (ІАНУ). – Київ, 2009. - №1. – С. 177-183.
37. Пастушенко В.Й. Автоматизована система керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Автоматизовані системи управління та прилади автоматики. - Харків, ХНУРЕ, 2009. - Випуск 147. - С. 46-52.
38. Пастушенко В.Й. Принципи побудови інтелектуальної системи керування вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. - Рівне, 2009. - Випуск 3 (47). Частина 1. – С. 187-194.
39. Пастушенко В.Й. Нейро-нечіткий регулятор для керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах з підґрунтовим зволоженням / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник.– Луцьк, 2010. - Випуск 27. - С. 264-269.
40. Пастушенко В.Й. Ідентифікація коефіцієнта вологопровідності ґрунту за допомогою нейронних мереж / В.Й. Пастушенко, С.К. Матус,

- А.М. Стеценко // Бионика интеллекта. Научно-технический журнал. – Харьков, ХНУРЭ, 2012. - Выпуск 1 (78). - С. 23-28.
41. Пастушенко В.Й. Прогнозування вологості ненасиченої зони ґрунту на основі neo-fuzzy мережі / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. Збірник наукових праць. - Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2012. - Выпуск 6. - С. 170-176.
42. Пастушенко В.Й. Використання neo-fuzzy мережі для керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – Київ, 2013. - Выпуск №48. – С. 49-53.
43. Пастушенко В.Й. Математичне моделювання динаміки вологозапасів кореневого шару ґрунту / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко, Р.О. Муран // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне, 2014. - Выпуск 1 (65). - С. 66-76.
44. Пастушенко В.Й. Розробка алгоритму керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні / В.Й. Пастушенко, С.К. Матус, А.М. Стеценко // Автоматика-2008. Доповіді міжнародної конференції з автоматичного управління, 23-26 вересня 2008 року. – Одеса: ОНМА, 2008. - Том 2. - С.887-890.
45. Пастушенко В.Й. Методика побудови моделі прогнозування вологозабезпечення сільськогосподарських рослин на основі нейронної мережі // В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // International Conference Problems of Decision Making Under Uncertainties (PDMU-2008). Abstracts, May 12-17. - Kyiv-Rivne, 2008. - P. 244-246.
46. Пастушенко В.И. Прогнозирование режимов увлажнения сельскохозяйственных культур на основе нейросетевых моделей / В.И. Пастушенко, А.М. Стеценко // Труды девятой международной

- научно-практической конференции Современные информационные и электронные технологии, 19-23 мая 2008 г. – СИЭТ-2008. - Одесса, 2008. - Том 1. - С. 36.
47. Пастушенко В.Й. Інтелектуальна система прийняття рішень при керуванні режимами зволоження сільськогосподарських культур на базі нейронної мережі // В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції Системний аналіз та інформаційні технології, 20-24 травня 2008 р. – Київ, Національний технічний університет України «КПІ», Ін-т прикладного системного аналізу, 2008. - С. 240.
48. Volodymyr Pastushenko Development and modeling of automated control system of agricultural cultures water wellbeing / Pastushenko V., Stetsenko A. // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proceedings of the X-th International Conference CADSM, February 24-28, 2009. – Polyana-Svalyava (Zakarpattya), 2009. - P. 121-124.
49. Пастушенко В.Й. Управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому та крапельному зрошенні в умовах дії випадкових погодних факторів / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // International Conference Problems of Decision Making Under Uncertainties (PDMU-2009). Abstracts. - Skhidnytsia, Ukraine, April 27-30, 2009. – P. 147-149.
50. Пастушенко В.И. Разработка и моделирование регулятора влагообеспеченности сельскохозяйственных культур на основе гибридных нейронных сетей / В.И. Пастушенко, А.М. Стеценко // Труды десятой международной научно-практической конференции Современные информационные и электронные технологии. – СИЭТ-2009, Одесса, 18-22 мая 2009. - Том 1. - С. 100.
51. Пастушенко В.Й. Автоматизовані системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому та крапельному зрошенні та їх технічна реалізація //

- В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // 16-а Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2009». Тези доповідей. - Чернівці, 22-25 вересня 2009. - С. 202-204.
52. Пастушенко В.Й. Методика керування вологістю ґрунту при вирощуванні сільськогосподарських культур на системах з підґрунтовим зволоженням на базі нейромережкових технологій / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // International Workshop Problems of Decision Making Under Uncertainties (PDMU-2009). Abstracts. - Kamyanets-Podilsky, October 5-9, 2009. - P. 93-95.
53. Pastushenko V. Development, modeling and technical implementation of automated control system of soil's moistness by underground irrigation / Volodymyr Pastushenko, Anastasia Stetsenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Proceeding of the X-th International Conference TCSET-2010 Dedicated to the 165-th Anniversary of Lviv Polytechnic National University. – February 23-27, 2010, Lviv-Slavske, Ukraine. - P. 33.
54. Пастушенко В.Й. Ідентифікація коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейромережкових технологій. / В.Й. Пастушенко, С.К. Матус, А.М. Стеценко // XVI International Conference “Problems and Decision Making Under Uncertainties” (“PDMU-2010”). Abstracts. – October 4-8, 2010, Yalta, Ukraine. - P. 112-113.
55. Пастушенко В.И. Информационное обеспечение автоматизированной системы управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур на основе нейросетевых технологий. / В.И. Пастушенко, А.М. Стеценко, А.В. Комар // Труды XI Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». Том 1. – СИЭТ-2010, Одесса, 24-28 мая 2010. - С. 71.
56. Пастушенко В.И. Програмне та технічне забезпечення автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських

- культур на меліоративних системах двосторонньої дії. / В.И. Пастушенко, А.М. Стеценко // XVII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2010». Тези доповідей. Том 1. – Харків, 27-29 вересня 2010. - С. 264-267.
57. Пастушенко В.Й. Автоматизація процесу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на меліоративних системах двосторонньої дії / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2011». Матеріали конференції. – 28-30 вересня 2011 року, Львів. - С. 107-108.
58. Pastushenko V. Development of neo-fuzzy model of non-saturated part of soil. / Volodymyr Pastushenko, Anastasia Stetsenko // XX International Conference “Problems and Decision Making Under Uncertainties” (“PDMU-2012”). Abstracts. – September 17-21, 2012, Brno, Czech Republic, Kyiv-2012. - P. 100.
59. Пастушенко В.Й. Використання neo-fuzzy мережі для керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні. / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2012». Матеріали конференції. – 26-28 вересня 2012 року, Київ. - С. 236-237.
60. Пастушенко В.Й. Використання нейронних мереж для керування вологозабезпеченістю на осушувально-зволожувальних системах. / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Тези Міжнародної науково-практичної конференції іноземних студентів «Розвиток національних економік в умовах глобалізації». – 22-23 жовтня 2012 року, Рівне. - С. 85-86.
61. Пастушенко В.Й. Обґрунтування математичної моделі вологопереносу в системах автоматизації волого забезпечення сільськогосподарських культур / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів. Матеріали

конференції 22 – 23 лютого 2013. – Рівне, 2013. – С. 119.

62. Пастушенко В.Й. Керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахуванням дії випадкових збурюючих факторів. / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Автоматика / Automatics-2013: Матеріали XX Міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-річчю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка 25-27 вересня 2013 р. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 205-206.
63. Пастушенко В.Й. Математичне моделювання динаміки вологозапасів кореневого шару ґрунту. / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко, Р.О. Муран // Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції науковців, м. Рівне, 12-14 лютого 2014 р. – Рівне : НУВГП, 2014. – С. 321-322.
64. Пастушенко В.Й. Керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах з використанням неο-fuzzy та нейронних мереж прямого поширення / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Матеріали Першої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2014); Київ, НТУУ «КПІ», 16-17 квітня 2014 р. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 121-122.
65. Пастушенко В.Й. Розробка та моделювання автоматизованої системи керування вологістю ґрунту з використанням інтелектуальних алгоритмів. / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Автоматика - 2014: Матеріали 21-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління, м. Київ, 23-27 вересня 2014 р. – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – С. 108-109.
66. Пастушенко В.Й. Керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на базі інтелектуальних алгоритмів /

- В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // XXVI International Conference “Problems and Decision Making Under Uncertainties” (“PDMU-2015”). Abstracts. – August 24-28, 2015, Odessa, Ukraine. - P. 120-121.
67. Пастушенко В.Й. Патент на корисну модель №26737, Україна, МПК (2006) G05D 22/00. Регулятор вологості кореневого шару ґрунту / В.Й. Пастушенко, С.К. Матус, А.М. Стеценко; власник патенту НУВГП - № U 2007 03637; заявл. 02.04.2007; опуб. 10.10.2007, Бюл. №16.
68. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. Е.В. Шеина. – Москва: Изд-во МГУ, 2001, 200 с.
69. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. / А.А. Роде. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — Т.2. — 288 с.
70. Рокочинський А.М. Оптимізація проектних технічних і технологічних рішень з водорегулювання осушуваних земель: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. тех. наук: 06.01.02 / А.М. Рокочинський . – Інститут гідротехніки і меліорації УААН. - Київ, 2002. – 35 с.
71. Руководство по проектированию осушительных систем в Украинской ССР: НТД 33.63-074-87: Утв. прик. Минводхоза УССР 15.12.86. № 345: Срок введения с 01.07.87. – К., 1987. – 529 с.
72. Руденко О.Г. Прогнозирующее управление нелинейными объектами на основе эволюционирующих сетей прямого распространения / О.Г. Руденко, А.А. Бессонов // Проблемы управления и информатики. – 2015. – № 6. – С. 46-55.
73. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский: Пер. с польского И.Д. Рудинского. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 452 с.
74. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин – Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 432 с.
75. Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации / С.М. Гончаров,

- С.М. Коробченко, С.В. Ковалёв, Г.С. Потоцкий; под ред. С.М. Гончарова, С.М. Коробченко. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1988. – 352 с.
76. Системна оптимізація водокористування при зрошенні. Монографія / П. Ковальчук, Н. Пендак, В. Ковальчук, М. Волошин. – Рівне: НУВГП, 2008. – 204 с.
77. Скрипник О.В. Мелиорация переувлажненных земель с микропонижениями без отвода дренажных стоков / О.В. Скрипник. - М.: Агропромиздат. - 2002. - Выпуск 5. - С. 34-35.
78. Скрипник О.В. Системы двустороннего регулирования водного режима / О.В. Скрипник // Гидротехника и мелиорация. - 1984. - №4. - С. 55-57.
79. Скрипник О.В. Расчет режима увлажнения на торфоболотных почвах / О.В. Скрипник, М.А. Солопко, П.И. Гаць // Гидротехника и мелиорация. - 1982. - №9. - С. 44-46.
80. Скрипник О.В. Технология регулирования водного режима осушаемых земель. / О.В. Скрипник, И.С. Сорока, В.П. Кубышкин – К.: Урожай, 1992. – 168 с.
81. Скрипник О.В. Автоматизированный водорегулирующий комплекс для осушаемых пойм / О.В. Скрипник, И.С. Сорока, М.А. Солопко, С.Ю. Бочаров, В.И. Шевель // Мелиорация и водное хозяйство. – 1988. - №8. – С. 44-46.
82. Стеценко А.М. Техническая реализация автоматизированной системы управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур на основе нейросетевых технологий. / А.М. Стеценко, С.В. Шатный, А.В. Пастушенко // Труды XI Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». Том 1. – СИЭТ-2010, Одесса, 24-28 мая 2010. - С. 72.
83. Стеценко А.М. Розробка інтелектуальних алгоритмів керування вологістю ґрунту. / А.М. Стеценко, В.Й. Пастушенко // Матеріали XV Міжнародного молодіжного форуму «Радиоелектроніка і молодіжь

- в XXI веке». Том 9. – Харьков, 18-20 апреля 2011. - С. 43-44.
84. Стеценко А.М. Автоматизована система керування вологістю ґрунту на меліоративних системах з підґрунтовим зволоженням на базі нейронних мереж / А.М. Стеценко // Матеріали XXII міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2015» (10-11 вересня 2015р., м. Одеса). – Одеса: ТЕС, 2015. – С. 184-186.
85. Тыщенко А.И. Гидравлическая автоматизация осушительно-увлажнительных систем / А.И. Тыщенко, А.Ф. Рубан // Гидротехника и мелиорация. - 1987. - №7. - С. 52-56.
86. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин – Москва: Горячая линия – Телеком, 2004. – 143 с.
87. Хайкин Саймон Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр.: Пер. с англ. / Саймон Хайкин – Москва: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
88. Чайлдс Э. Физические основы гидрологии почв. Пер. с англ А.М. Глобуса. / Э. Чайлдс -Л.: Гидрометеиздат., 1973. – 426 с.
89. Шевчук С.А. Оцінка та прогнозування підтоплення території на основі нейронних мереж у задачах моніторингу / С.А. Шевчук // Меліорація і водне господарство. – Київ: Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2011. – Випуск 99. – С. 147-159.
90. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. / Е.И. Юревич – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.
91. Янголь А.М. Двустороннее регулирование влажности при осушении / А.М. Янголь. – М: Колос, 1970. – 136 с.
92. Янголь А.М. Рекомендации по увлажнению осушаемых земель / А.М. Янголь, Ш.И. Брусиловский, К.С. Семенов под общ. ред. А.М. Янголя. - К.: Урожай, 1965. – 88 с.
93. Ahmad M. Ibrahim Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications / Ahmad M. Ibrahim. - Amsterdam: Elsevier, 2004. – 293 p.
94. Anderson, Mary P Applied groundwater modelling: simulation of flow and

- advective transport. Second edition / Mary P. Anderson, William W Woessner, R J Hunt. – London, UK: Academic Press, 2015.
95. Bodyanskiy Ye. Evolving network based on double neo-fuzzy neurons / Ye. Bodyanskiy, Ye. Gorshkov, V. Kolodyazhniy, P. Otto // Proc. 52nd Int. Scientific Coll. “Computer Science Meets Automation”. – TU Ilmenau (Thuer), 2007. – P. 35-40.
 96. Bojadziev G. Fuzzy Logic for Business, Finance and Management / George Bojadziev, Maria Bojadziev. - New Jerse: World Scientific Publishing Co., 2007. – 232 p.
 97. Brooks R.H. Hydraulic properties of porous media. / R.H. Brooks, A.T. Corey // Hydrology Paper 1964, № 3, Civil Engineering Dep., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado. – P. 27.
 98. Chen, G. (Guanrong) Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems / Guanrong Chen, Trung Tat Pham. - Boca Raton, London, New York: CRC Press LLC, 2001. – 316 p.
 99. Demicco, Robert V. Fuzzy Logic in Geology / Robert V. Demicco, George J. Klir. – Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. – 347 p.
 100. Ding L. The new Paradigm of Knowledge Engineering by Soft Computing / Liya Ding. – Sinaapore: World Scientific, 2001. – 374 p.
 101. Driankov Dimiter Fuzzy Logic and Fuzzy Control / Dimiter Driankov, Peter W. Eklund, Anca L. Ralescu. – Berlin: Springer-Verlag, 1994. – 167 p.
 102. Espinosa J. Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control / Jairo Espinosa, Joos Vandewalle, Vincent Wertz. – USA: Springer-Verlag London Limited, 2005. – 263 p.
 103. Feddes R.A. Unsaturated-zone Modeling. Progress, Challenges and Applications / R.A. Feddes, G.H. de Rooij, J.C. van Dam. – Dordrecht: Kluver Academic Publishers, 2004. – 367 p.
 104. Fisher, R.A. Statistical Methods for research workers. / R.A. Fisher. - Oliver and Boyd. 1954.
 105. Ghanbarian B. Sample dimensions effect on prediction of soil water retention

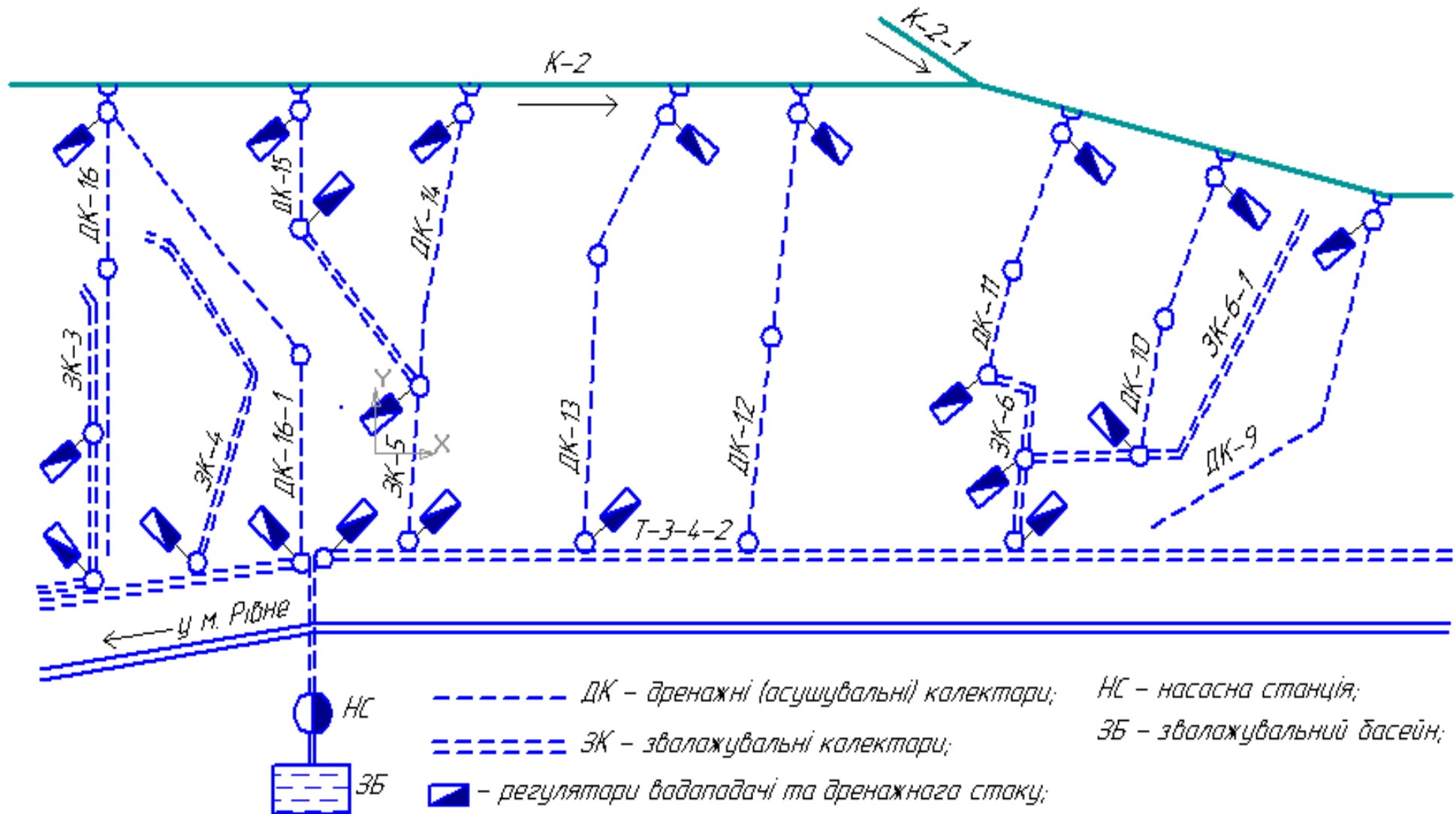
- curve and saturated hydraulic conductivity / Behzad Ghanbarian, Vahid Taslimitehrani, Guozhu Dong, Yakov A Pachepsky // *Journal of Hydrology*. – USA, 2015. – v.528. – P. 127-137.
106. Gil-Lafuente Anna Maria *Fuzzy Logic in Financial Analysis* / Anna Maria Gil-Lafuente. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 450 p.
107. Grebennik I.V. Interval estimation of alternatives in decision-making problems / I.V. Grebennik, T.E. Romanova, S.B. Shekhovtsov // *Cybernetics and Systems Analysis*, 45(2), 2009. – P. 253–262.
108. Hagemann S. Impact of the soil hydrology scheme on simulated soil moisture memory / Stefan Hagemann; Tobias Stacke // *Climate Dynamics : Observational, Theoretical and Computational Research on the Climate System*. – 2015. – v.44, n.7-8.
109. Hassanzadeh E. Managing water in complex systems: An integrated water resources model for Saskatchewan, Canada / Elmira Hassanzadeh; Amin Elshorbagy; Howard Wheater; Patricia Gober // *Environmental Modelling and Software*. – Canada, 2014. – v.58. – P. 12-26.
110. Jamshidi·M. *Large-Scale Systems: Modeling, Control and Fuzzy Logic* / Mohammad Jamshidi. – New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997. – 578 p.
111. Jang J.-Sh. R. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing* / Jang J.-Sh. R., Sun Ch.-T., Mizutani E. - Upper Saddle River , NJ: Prentice Hall, 1997. – 514 p.
112. Kecman Vojislav *Learning and Soft Computing. Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models* / Vojislav Kecman. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2001. – 541 p.
113. Leondes C. *Fuzzy Logic and Expert Systems Applications* / Cornelius T. Leondes. – San Diego: Academic Press, 1998. – 416 p.
114. McNeill, F. *Martin Fuzzy logic: a practical approach* / F. Martin McNeill, Ellen Thro. – Boston: AP Professional, 1994. – 292 p.
115. Miki T. Analog implementation of neo-fuzzy neuron and its on-boarding learning/ T. Miki, T. Yamakawa // Ed. by N.S. Mastorak-is “Computational Intelligence and Application”. – Piraeus: WSES Press, 1999. – P. 144-149.

116. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. / Y.A. Mualem // *Water Resour. Res.*, 1976, № 12. - P. 513-522.
117. Pachepsky Y. Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology / Y. Pachepsky Y., W.J. Rawls. – Amsterdam: Elsevier, 2004. – 512 p.
118. Pachepsky Y.A. Pedotransfer in soil physics: Trends and outlook - A review / Y.A. Pachepsky, K. Rajkai, B. Toth // *Agrokemia es Talajtan.* – 2015. – v.64, n.2. – P. 339-360.
119. Pachepsky Y. Saturated Hydraulic Conductivity of US Soils Grouped According to Textural Class and Bulk Density / Yakov Pachepsky, Yongeun Park // *Soil Science Society of America Journal.* – USA, 2015. – v.79, n.4.
120. Poulton, Mary M. Computational neural networks for geophysical data processing / Mary M. Poulton. – Amsterdam: 2001. – 335 p.
121. Ross, Timothy J. Fuzzy Logic with Engineering Applications / Timothy J. Ross. – England: John Wiley & Sons Ltd., 2004. – 628 p.
122. SALTMED Model as an Integrated Management Tool for Water, Crop, Soil and N-Fertilizer Water Management Strategies and Productivity: Field and Simulation Study / [R Ragab; A Battilani; G Matovic; R Stikic; G Psarras; K Chartzoulakis; et al] // *Irrigation and Drainage.* – 2015. – v.64, n.1, (February 2015). – P. 13-28.
123. Sen Zekai Fuzzy logic and hydrological modelling / Zekai Sen. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010. – 340 p.
124. Sen Zekai Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy / Zekai Sen. – London: Springer-Verlag London Limited, 2008. – 276 p.
125. Sen Zekai Spatial Modeling. Principles in Earth Sciences / Zekai Sen. – London: Springer Science+Business Media B.V., 2009. – 351 p.
126. Sen Zekai Wadi Hydrology / Zekai Sen. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2008. – 347 p.

127. Sigeru Omatu Neuro-Control and its Applications / Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiyah Yusof. – London: Springer, 1996. – 272 p.
128. Sivanandam S.N. Introduction to Fuzzy Logic using Matlab / S.N. Sivanandam, S. Sumathi, S.N. Deepa. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 430 p.
129. Van Genuchten, M.Th. A Closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils / M. Th. Van Genuchten // Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, vol. 44. - P. 892-898.
130. Vrzel Janja Data preparation for groundwater modelling - Ljubljansko polje aquifer system = Priprava podatkov za modeliranje podzemne vode - vodonosni sistem Ljubljansko polje / Janja Vrzel; Nives Ogrinc; Goran Vizintin // RMZ - Materials and geoenvironment. – 2015. – Vol. 62, no. 3 (2015). – P. 167-173.
131. Wang, Paul P. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Fuzzy Logic: A Spectrum of Theoretical and Practical Issues / Paul P. Wang, Da Ruan, Etienne E. Kerre. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 459 p.
132. Wheater H.S. Uncertainty in groundwater flow and transport modelling – a stochastic analysis of well-protection zones / H.S. Wheater, J.A. Tompkins, M. van Leeuwen, A.P. Butler // Hydrological Processes. – 2000. – Vol. 14. – P. 2019–2029.
133. Wheater Howard Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas / Howard Wheater. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 159 p.
134. Wheater Howard Hydrological modelling in arid and semi-arid areas / Howard Wheater, Soroosh Sorooshian, K.D. Sharma. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 223 p.
135. Yamakawa T. A neo-fuzzy neuron and its applications to system identification and prediction of the system behavior / T. Yamakawa, E. Uchino, T. Miki, H. Kusanagi// Proc. 2nd Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks “IIZUKA – 92”. – Iizuka, Japan, 1992. – P. 477-483.

ДОДАТОК А

Схема експериментальної ділянки Рівненської дослідної сільськогосподарської станції



ДОДАТОК Б

Фактори впливу на ріст та розвиток сільськогосподарських культур

Вплив аерації ґрунту на ріст рослин. Надлишок води у ґрунті зменшує обмін повітря між ґрунтом і атмосферою. Тому у перезволожених ґрунтах зменшується вміст кисню, що веде до пригнічення дихання кореневої системи, зменшення її маси, збільшення опору руху води та поживних речовин у кореневій системі, а також створюються токсичні речовини у ґрунті та рослинах. [20] Коріння практично всіх неводних рослин пошкоджується, клітини втрачають проникність і навіть настає їх загибель, якщо ґрунт протягом тривалого часу перезволожений. Певна кількість O_2 у ґрунті необхідна для мінералізації мікробами органічних рештків. Недостатня аерація ускладнює мікробіологічну активність, тому у ґрунті зменшується вміст NH_3 та NO_3 .

На всі біологічні процеси сильно впливає температура середовища. Перезволожені землі завдяки тому, що вода є найбільш теплоємною речовиною у природі, більш теплоємні, тому для підняття їх температури потрібно більше тепла. Перезволожені землі мають також більшу теплопровідність, тому приморозки на них сильніші і трапляються пізніше, ніж на сухих, від чого також терплять рослини.

Головна мета осушення ґрунтів у гумідній зоні полягає у зниженні їх вологості до таких значень, за яких полегшується проникнення повітря разом з O_2 у верхні шари ґрунту та видаленні з них CO_2 , що виробляється корінням рослин і мікроорганізмами, а також для проходження хімічних реакцій. Зниження вологовмісту виражається також у поліпшенні теплового режиму ґрунту. Навесні ці зміни найбільші і мають особливе значення.

Водні рослини, наприклад рис, мають великі міжклітинні порожнини, наповнені повітря, якими O_2 транспортується до коріння. Хоча відомо, що коріння багатьох рослин може отримувати деяку кількість O_2 шляхом внутрішньої дифузії, але основний об'єм O_2 до нього надходить завдяки

дифузії з атмосфери через ґрунт. Шпари ґрунту частково заповнені газом, а частково – ґрунтовим розчином. Тому транспортування O_2 та CO_2 може відбуватися у двох фазах: газовій та рідинній. У першій – шляхом обміну між атмосферою та ґрунтом, у другій – шляхом руху рідини до коріння та від нього.

Обмін повітрям між ґрунтом і атмосферою здійснюється через газонаповнені шпари. Протягом шляху повітря через ґрунт з нього поглинається O_2 та утворюється CO_2 . Якщо об'єм заповнених повітрям шарів малий і немає безперервного повітряного простору у ґрунті, дифузія газів буде малою, або й зовсім припиниться. Встановлено, що глибина ґрунту, на якій дифузія припиняється, приблизно дорівнює всмоктуваному чому тиску ґрунту у точці вигину кривої зв'язку всмоктуючого тиску з вологістю ґрунту, вираженому у метрах водного стовпа. Тому можна вважати, що вміст повітря у ґрунті, що відповідає точці вигину головної гідрофізичної характеристики, є критичною аерацією ґрунту. Для більшості рослин це 5-15% об'єму шарів [10]

Як поглинання O_2 , так і виділення CO_2 залежать від температури, вологості ґрунту, його родючості, кількості та складу в ньому органіки, насиченості корінням. Тому інтенсивність дихання ґрунту змінюється у часі та за глибиною. Кореневі волоски рослин оточує водяна плівка, яка утруднює підхід O_2 до коріння. Чим більша товщина водяної плівки, тим більше вона здатна протидіяти дифузії кисню. Дифузія кисню зменшується і на пересіченнях ґрунтових шарів внаслідок опору, створюваного твердими частинками ґрунту, тому дифузія у насичених ґрунтах навіть менша, ніж у воді.

Нестача кисню у перезволожених землях є одним з основних стримуючих факторів розвитку рослин і виражається у збільшенні опору руху води через коріння. Ріст рослин в анаеробних ґрунтах пригнічується внаслідок наступних факторів:

- вироблення мікроорганізмами токсичних для рослин сполук, наприклад, сульфідів і масляних кислот;
- утворення токсичних сполук у самих рослинах;

- створення більшої розчинності закисних сполук металів, особливо марганцю;
- зменшення вмісту мінералів у рослинах: калію, азоту, фосфору, кальцію та магнію;
- зниження транспортуючої здатності коренів, зростання концентрації протоплазми корневих клітин, зменшення внаслідок цього мінеральної складової наземної частини рослин;
- зниження інтенсивності життєвих процесів.

Надмірний вміст CO_2 також згубно впливає на рослини, але у більшості ґрунтів його вміст рідко досягає критичного рівня, тому основні проблеми, які виникають при недостатній аерації ґрунту, спричинені дефіцитом O_2 . Вважається, що сільськогосподарські культури добре ростуть при концентрації O_2 у ґрунтовому повітрі 5-50% і CO_2 нижче 10%. Інтенсивність дифузії кисню зменшується з глибиною і залежить також від рівня ґрунтових вод. Чим менший РГВ, тим менша інтенсивність дифузії кисню, особливо цей вплив помітний на глибинах ґрунту до 40 см.

Низький вміст O_2 у ґрунті може трапитися після дощу чи поливу у погано водопроникних ґрунтах, при наявності великої кількості органіки, що добре розкладається, або за високих температур ґрунту. Шкода від тимчасової нестачі O_2 залежить від виду рослин, фази їх розвитку, терміну, сонячної радіації, вмісту органіки у ґрунті. Наприклад, багаторічні трави добре витримують затоплення протягом кількох тижнів за низької температури ґрунту на ранніх стадіях вегетації. У той час перезволоження гороху безпосередньо перед цвітінням протягом однієї доби знижує його врожай на третину.

Вплив температури ґрунту на рослини. Теплоперенесення у ґрунтах пов'язане з рухом води. Волога у ґрунті рухається з тепліших до холодніших областей, оскільки температура впливає на в'язкість і силу, з якою поверхня ґрунтових частинок притягує воду. Але теплоперенесення, пов'язане із

вологоперенесенням, невелике. Більше теплоперенесення відбувається внаслідок випаровування у тепліших областях і конденсації у холодніших [20].

Температура ґрунту впливає на ріст рослин. За низької температури стримується розкладання органіки, внаслідок чого виникає дефіцит азоту, знижується темп росту коренів, зменшується площа їх поглинаючої поверхні. Існує три критичні точки: мінімальна температура, нижче якої рослина не розвивається, оптимальна, за якої спостерігається найвища життєдіяльність, максимальна, за якої життєдіяльність знову припиняється. Низькі температури сильніше пригнічують теплолюбні рослини. Температура ґрунту значно менше впливає на фотосинтез, ніж сонячна радіація, але вплив температури ґрунту зростає із ростом температури повітря.

Осушення впливає на температуру ґрунту, оскільки воно змінює вміст води у ньому. Найсильніше осушення змінює температуру ґрунту навесні, коли вона низька. Проростання насіння та ріст рослин у початковій фазі розвитку сильно залежать від температури. Встановлено, що з ростом температури на 10°C в інтервалі від 0°C до $25\text{--}35^{\circ}\text{C}$ швидкість проростання насіння зростає вдвічі. Найнижча температура ґрунту, за якої пробуджується насіння, називається біологічним мінімумом схожості T_{min} . Для ранніх ярових зернових, зернобобових та коренеплодів $T_{min} = 2^{\circ}\text{C}$, для льону та коноплі $T_{min} = 3^{\circ}\text{C}$, для картоплі та кукурудзи $T_{min} = 8^{\circ}\text{C}$. Найкращі строки сівби, коли ґрунт прогрівається до біологічного мінімуму. Такі температури несприятливі для розвитку грибкових хвороб.

Вологість ґрунту впливає на його температурні властивості. У сухого ґрунту нижча теплоємність, тому необхідна менша кількість тепла для підняття його температури. Сухий ґрунт світліший за вологий, тому більше відбиває сонячні промені. Вологий ґрунт темніший, тому більше поглинає сонячну енергію, але його температура при цьому підвищується повільно через велику теплоємність. Температура вологого ґрунту знижується також внаслідок випаровування. Дренаж найбільше впливає на температуру ґрунту у період

його перезволоження навесні. Літом ґрунт прогрівається внаслідок сонячної радіації, восени накопичений запас теплоти достатній для підтримання температури ґрунту вище критичного значення. РГВ впливає на температуру верхніх шарів ґрунту. Збільшення глибини залягання ґрунтових вод підвищує температуру ґрунту, причому ця зміна більше помітна у піщаних ґрунтах, які краще пропускають воду, ніж у глинистих.

Вплив вологості ґрунту на ріст та розвиток рослин. Аерація ґрунту впливає на наявність важливого елемента живлення рослин – азот (N). Він може споживатися рослинами у формі нітратів, аміаку чи амінокислот. Джерелами азоту для рослин є азотні добрива, розклад органічних рештків мікробами до мінеральних форм, фіксація азоту з ґрунтового повітря деякими видами бактерій, що оселяються в основному на корінні бобових культур [20]. В анаеробних умовах процеси нітрифікації припиняються. Великі втрати азоту відбуваються внаслідок діяльності анаеробних мікробів, які з метою добування кисню розкладають NO_3^- , перетворюючи його у форму N_2 . Значні втрати азоту мають місце внаслідок його винесення дренажними водами.

Достатнє забезпечення рослин азотом може бути досягнуте лише за певної аерації ґрунту. Кількість доступного для рослин азоту та ефективність азотних добрив зростають з поліпшенням дренажності ґрунту. Навіть за короткочасного перезволоження вміст азоту у ґрунті знижується нижче критичного рівня, внаслідок швидкого його вимивання.

Вода, радіація, теплота та поживні речовини – основні чинники розвитку рослин. Для нормального росту рослин вони мають бути у деякому оптимальному діапазоні. Надмірна або недостатня кількість кожного з них шкідлива для рослин, пригнічує їх розвиток, що призводить до втрати частини або навіть всього врожаю та гибелі рослин.

Вода рослині необхідна для наступних цілей:

- як джерело речовини для органічного синтезу;
- як середовище, в якому відбуваються різні біохімічні реакції;
- для розчинення поживних речовин;

- для охолодження рослин внаслідок випаровування води.

Для забезпечення своєї життєдіяльності рослини змушені пропускати через себе значну кількість води, яка в тисячі разів перевищує їх суху масу. Основним джерелом води для рослин є ґрунт. Тільки незначна частина вологи надходить у рослину через листя. Вода, що надходить у рослину, перебуває під дією двох протилежно напрямлених сил. Гравітація та всмоктуюча сила ґрунту разом з порівняно невеликим осмотичним тиском ґрунтового розчину прагнуть до втримання води у ґрунті. З іншого боку, на вологу у прикореневій зоні діє всмоктуючий тиск кореня разом із всмоктуючим тиском, що створюється листям під час транспірації, тобто випаровування води рослиною під дією сонячної енергії. Осмотичний тиск ґрунтового розчину пропорційний його концентрації. Всмоктуюча сила ґрунту, тобто сила протягування води поверхнею частинок ґрунту, пропорційна його питомій поверхні, тобто залежить від механічного складу ґрунту, а також від його вологості. Кореневий тиск досягає 1-2 атм, що достатньо для підйому води до листя. Усі осмотичні процеси у рослині можуть відбуватися, поки жива протоплазма, тобто у живій рослині. У клітинах листової поверхні, що випаровують воду і стають ненасиченими вологою, розвивається значно більший всмоктуючий тиск, який сягає 5-10 атм. Вода з поживними речовинами транспортується до листя від коренів існуючими у кожній рослині трубчастими каналами.

В середині XIX століття було встановлено, що не вся вода, що є у ґрунті, може бути використана рослинами. Рослини можуть гинути від засухи, коли у ґрунті ще є помітна кількість вологи. Як правило, рослини гинуть, коли ґрунт висихає до максимальної гігроскопічності. Але прикмети пригнічення розвитку рослин спостерігаються за значно вищої вологості. Вологість ґрунту, за якої спостерігається пригнічення розвитку рослин і припиняється їх розвиток, але ще не настає загибель, називається вологістю зав'ядання (ВЗ). ВЗ – це така вологість ґрунту, за якої листя рослин, що ростуть у ньому, починають в'янути через нестачу води. Стале зав'ядання – такий стан листя, коли воно не може відновити свій нормальний стан у повністю насиченій водою атмосфері без

збільшення вологості ґрунту. ВЗ є ґрунтовою константою і не залежить від виду рослин. Звичайно, на ВЗ впливають і інші зовнішні умови транспірації: радіація, температура, вологість повітря, швидкість вітру, фаза розвитку рослин, тому на практиці для рослин, які ростуть у відкритому ґрунті, ВЗ перебуває у досить широкому діапазоні. ВЗ встановлюється тоді, коли максимальний всмоктуючий тиск, який може розвивати рослина, дорівнює водоутримуючій силі ґрунту – близько 15 атм. За водоутримуючої сили ґрунту близько 20 атм рослини гинуть. Коли водоутримуюча сила перевищує максимально можливий всмоктуючий тиск, який може розвивати рослина, то ґрунт відсмоктуватиме воду з рослин. Оскільки водоутримуюча властивість ґрунту пропорційна вмісту гумусу та площі питомої поверхні ґрунту, то ВЗ зростатиме по мірі зменшення розмірів частинок ґрунту.

Повна вологоємність (ПВ) – така вологість ґрунту, при якій усі ґрунтові шпари заповнені водою. За таких умов усі рослини, крім водних, потерпають від нестачі кисню. Максимальна рівноважна вологість (МРВ), або найменша вологоємність (НВ) – вологість, при якій великі шпари ґрунту під дією сил гравітації звільняються від води. На всіх ґрунтах при МРВ спостерігається сприятливе для рослин співвідношення між вмістом води та повітря. В інтервалі між МРВ – ВЗ знаходиться вологість гальмування росту рослин (ВГР). У діапазоні ВГР – ВЗ відбувається зворотна шкідлива зміна фізіологічних процесів у рослин, що затримує їхній ріст і знижує врожай. Після перевищення ВГР фізіологічні процеси приходять у норму. ВГР залежить від виду рослин, фази їх розвитку, водних властивостей ґрунту, погоди. Рослини найбільш чутливі до нестачі вологи під час формування генеративних органів. Крива зв'язку врожайності з вологістю ґрунту має дзвоноподібну форму з максимумом в інтервалі оптимального вологовмісту МРВ – ВГР. Причому зміна радіаційного, теплового, поживного режимів та інших умов життєдіяльності рослин у межах, що зустрічаються на практиці, суттєво не впливають на форму цього зв'язку [20].

Отже, можна зробити висновок, що вологість ґрунту сильно впливає на ріст рослин, а, отже, і на їх врожайність. Деяка частина вологи у ґрунті зовсім недоступна для рослин. При зниженні вологості ґрунту до ВЗ настає категорія труднодоступної вологи, за якої рослини ще не гинуть, але вже не можуть рости. Наступна категорія води в інтервалі ВЗ – ВГР доступна для рослин, але вимагає надмірного зусилля щодо її видобування, тому розвиток рослин затримується. Найкраще себе почувають рослини в інтервалі вологості ґрунту ВГР – МРВ. Подальше підвищення вологості ґрунту вже таїть небезпеку погіршення його аерації, а, отже, і зниження врожайності.

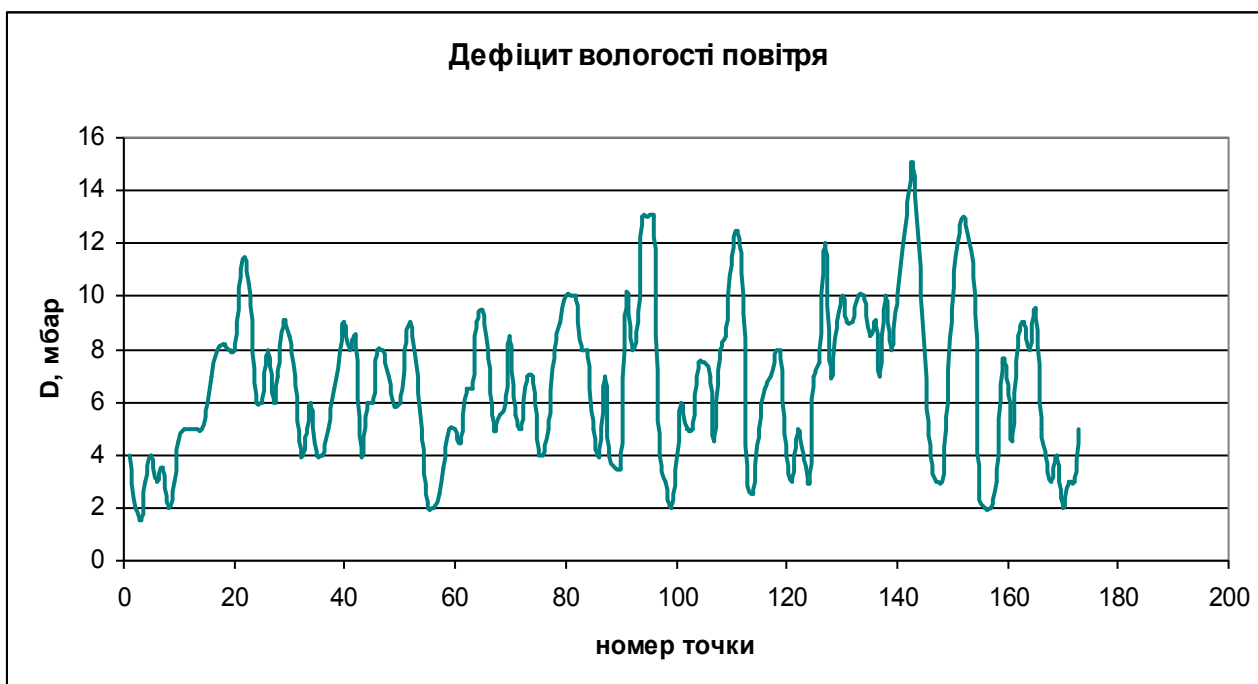
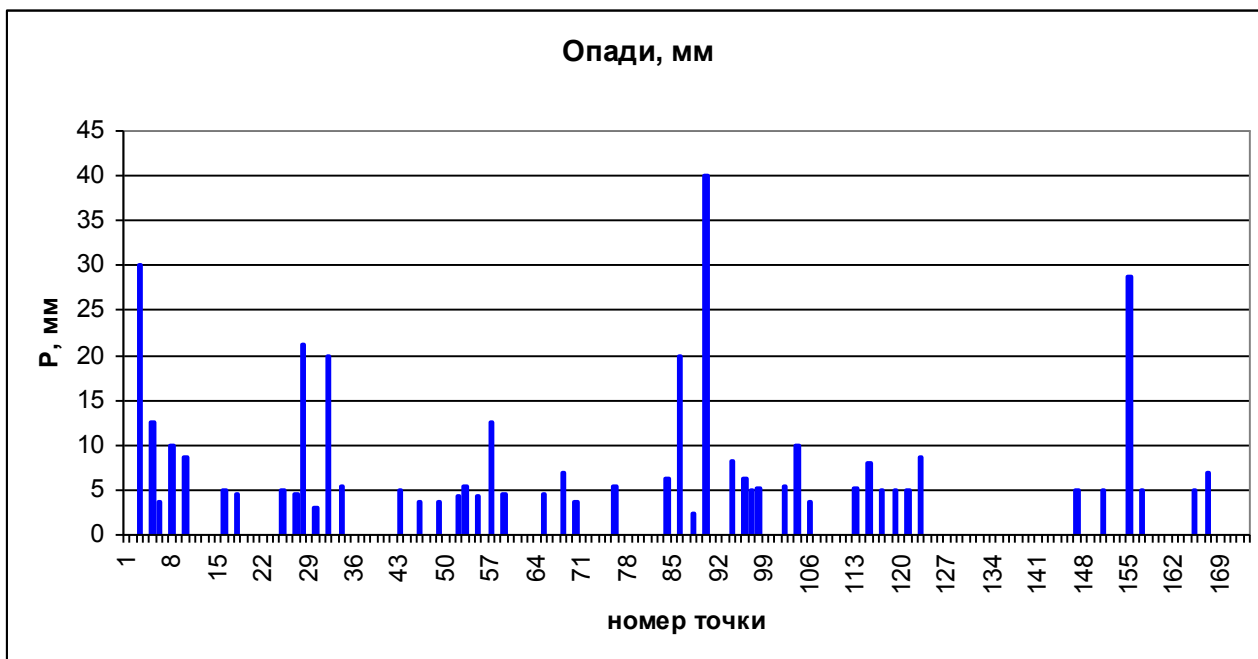
Вплив рівня ґрунтових вод на врожайність рослин. У польових умовах система ґрунт – рослина безперервно змінюється, тому для оцінки впливу фізичних умов на ріст рослин необхідно виявити їх взаємозв'язок протягом усього вегетаційного періоду [20]. Від рівня ґрунтових вод (РГВ) залежить вологість ґрунту, його аерація та температура. Результати експериментальних спостережень, що проводилися вченими у різних країнах, зокрема у Нідерландах, показують, що існує деякий оптимальний РГВ, за якого досягається максимальна врожайність. Значення оптимального РГВ залежить від типу ґрунту. При відхиленні РГВ від оптимуму як у менший, так і у більший бік врожайність рослин падає. За значної глибини РГВ зв'язок між ним та врожайністю втрачається. Така залежність пояснюється тим, що за малих значень РГВ рослини страждають від недостатньої аерації ґрунту, а за великих – від дефіциту води, викликаним зменшенням вологопереносу з ґрунтових вод у кореневий шар ґрунту. Відносно положення графіків залежностей врожайності від РГВ залежить від фізичних властивостей ґрунту, таких як водоутримуюча здатність, коефіцієнт вологопровідності тощо.

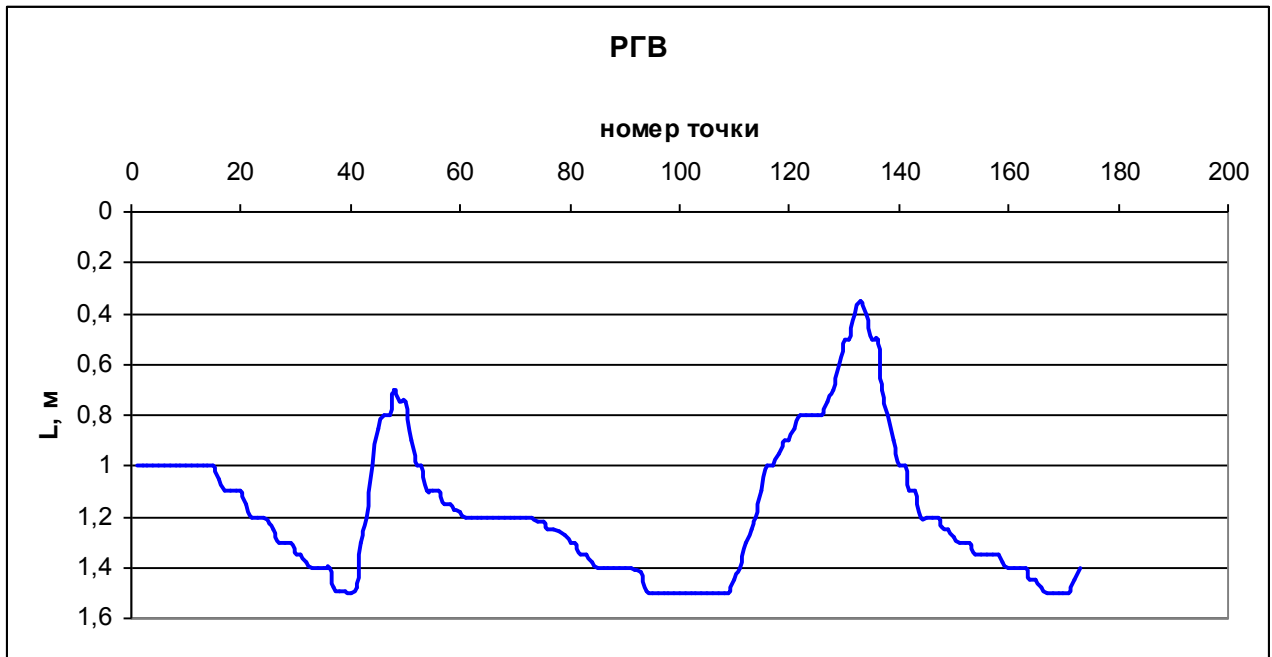
Характер залежності врожайності – РГВ залежить від виду рослин та фаз їх розвитку. Рослини з мілко розташованою кореневою системою вимагають менших значень РГВ, ніж рослини з корінням, що поширюється на значну глибину. Оптимальне значення РГВ залежить і від виду ґрунту: воно більше на глинистих ґрунтах і менше на піщаних, оскільки перші мають більшу

водуотримуючу здатність. Не підкоряються цим правилам торфові ґрунти, оскільки на необхідну РГВ впливають також осадка та окислення. Положення оптимуму, особливо для ґрунтів з малою водуотримуючою здатністю, значно залежить від кліматичних умов. У сухі періоди оптимальний РГВ зменшується, у вологі – збільшується. Використовуючи дані з вимог рослин до водного режиму ґрунту, фізичні властивості ґрунтів і кліматичні умови, можна обчислити оптимальне значення РГВ, за якого врожаї будуть найбільшими. Таке значення РГВ називається нормою осушення. Для піщаних ґрунтів вона перебуває у межах 0.6-0.9 м, для глинистих – 1-1.5 м.

Негативно впливає на врожайність культур також перезволоження ґрунту у не вегетаційний період – жовтень-квітень. Це пов'язано зі зниженням активності окисно-відновлювальних процесів у ґрунті, а також з порушенням структури ґрунту внаслідок чергування замерзання та розмерзання насичених водою ґрунтових агрегатів. Значний вплив чинять і інші фактори, наприклад, температура ґрунту. Негативний вплив на врожайність при зимовому перезволоженні буде у роки з вищою температурою ґрунту.

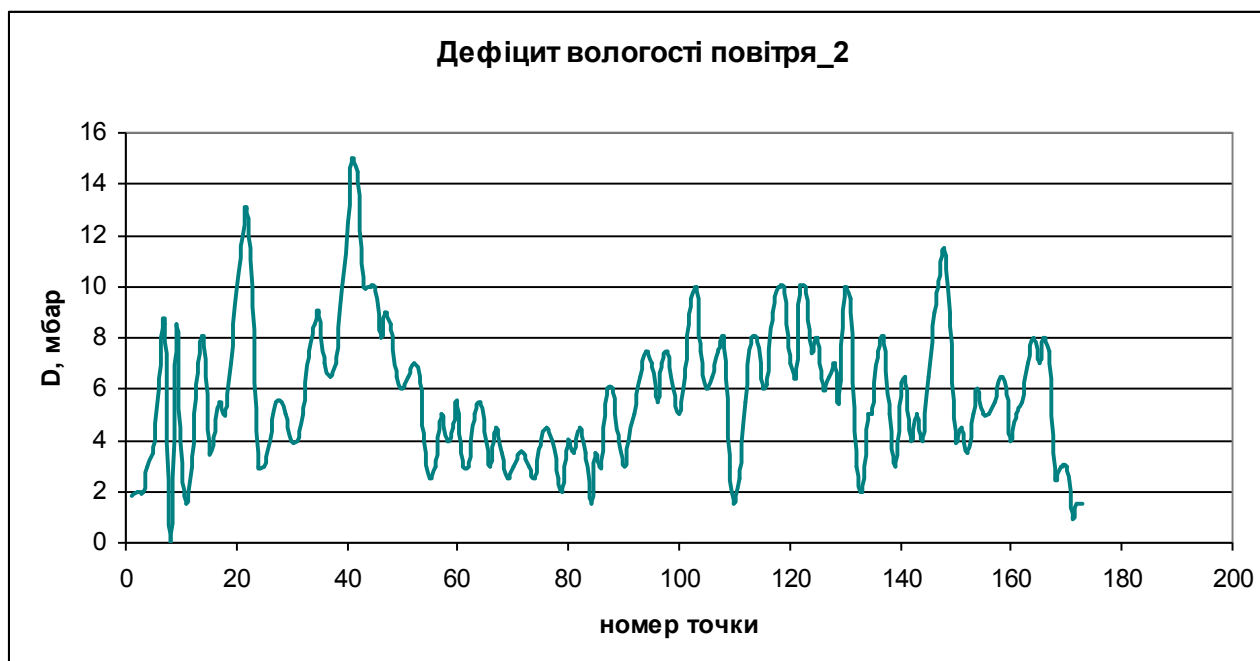
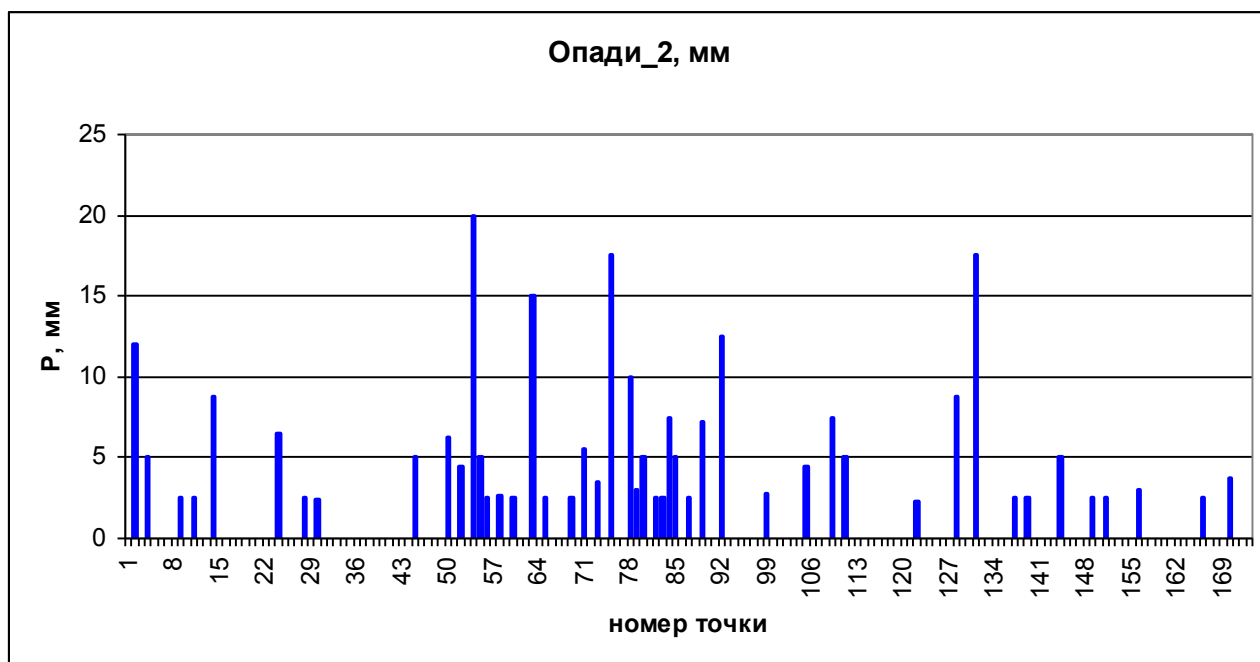
Позитивний вплив осушення перезволожених земель на врожайність рослин пояснюється також поліпшенням структури ґрунту. При осушенні ґрунтів відбувається зменшення їх об'єму, створюються тріщини. Це явище посилюється зі збільшенням у ґрунті вмісту глинистих частинок. Осушені землі промерзають на більше глибину, внаслідок чого глибше відбувається процес структуроутворення. Завдяки цьому поліпшується аерація нижніх шарів ґрунту і тому глибше проникає коріння рослин, що посилює процес гумусоутворення та оструктурення. Завдяки збільшенню шпаруватості осушені землі в суху погоду здатні краще приймати та втримувати воду. Усе це поліпшує родючість ґрунту.

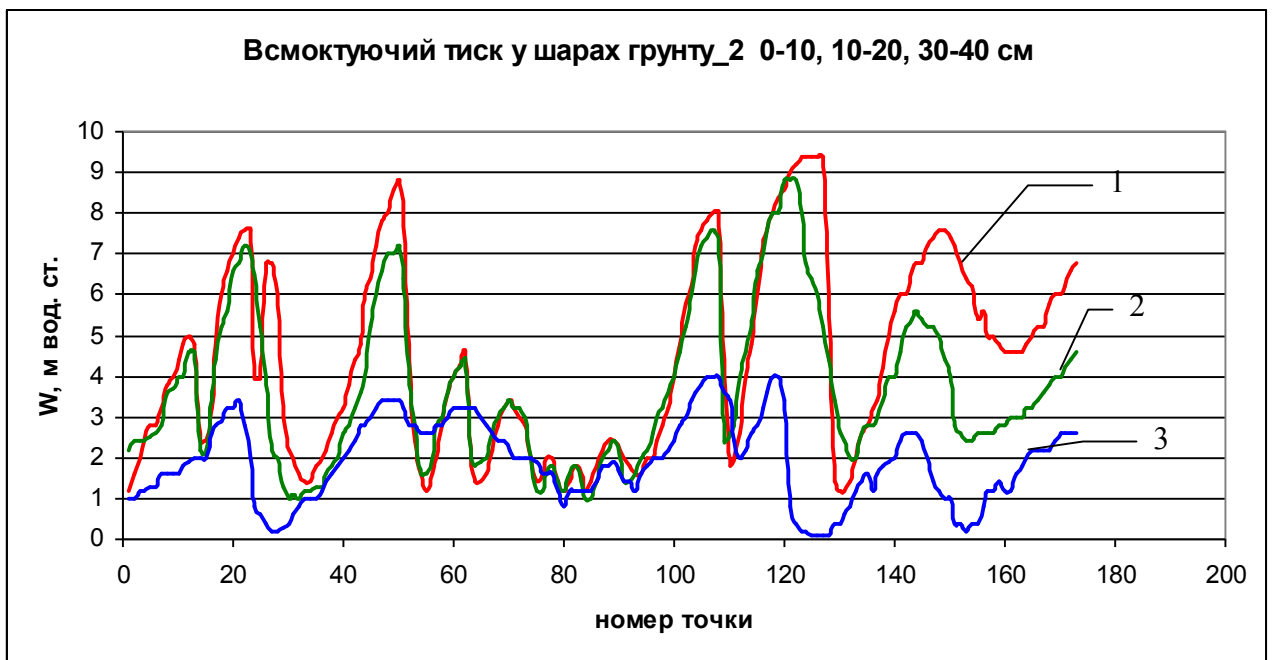
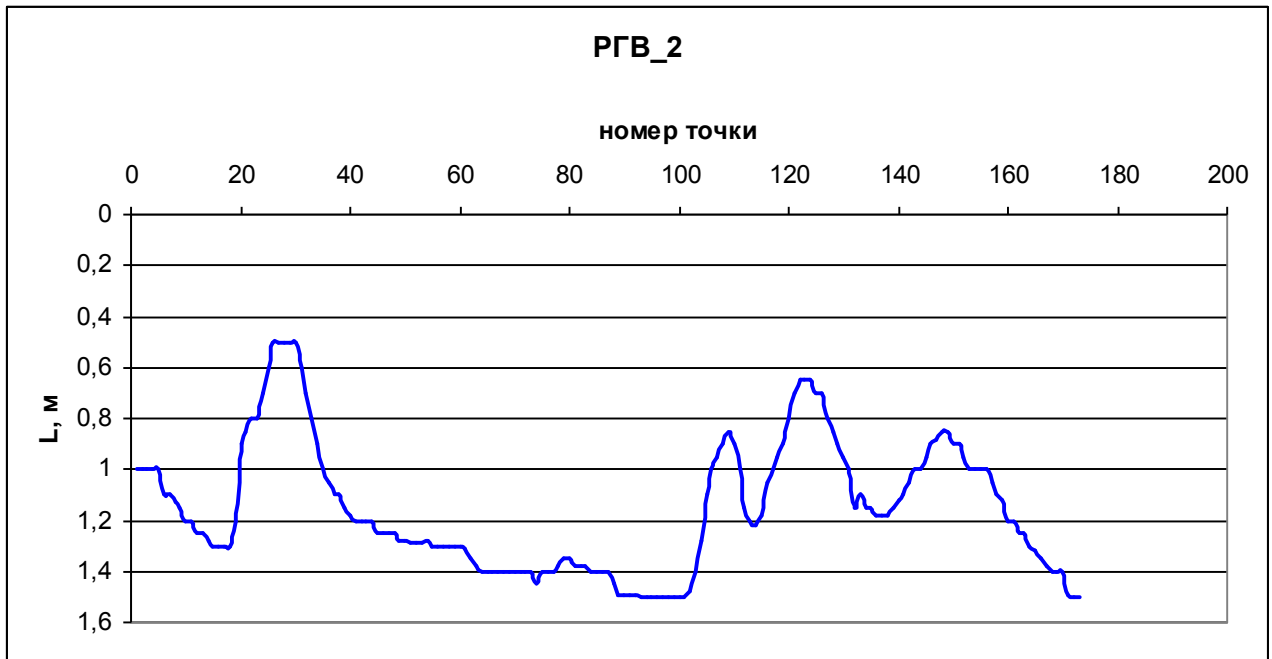
ДОДАТОК В**Навчальна та тестувальна вибірки даних Рівненської дослідної
сільськогосподарської станції****Навчальна вибірка даних Рівненської дослідної сільськогосподарської
станції**



- 1 - всмоктуєчий тиск у шарі ґрунту 0-10 см;
- 2 - всмоктуєчий тиск у шарі ґрунту 10-20 см;
- 3 - всмоктуєчий тиск у шарі ґрунту 30-40 см;

Тестувальна вибірка даних Рівненської дослідної сільськогосподарської станції





- 1 - всмокту́ючий тиск у шарі ґрунту 0-10 см;
- 2 - всмокту́ючий тиск у шарі ґрунту 10-20 см;
- 3 - всмокту́ючий тиск у шарі ґрунту 30-40 см;

ДОДАТОК Г

Вагомість входних сигналів при навчанні та тестуванні багатошарових неймереж

| Сигнал | Значимість |
|-------------|------------|
| P_+1_ | 0,5664401 |
| D_+1_ | 0,1400181 |
| L_+1_ | 0,1477121 |
| W_h=0-10sm_ | 1 |

а)

| Сигнал | Значимість |
|--------|------------|
| P3 | 1 |
| D3 | 0,3076802 |
| L3 | 0,7083549 |
| W2 | 0,7673448 |

б)

| Сигнал | Значимість |
|--------|------------|
| P3 | 1 |
| D3 | 0,1336307 |
| L3 | 0,3268132 |
| W2 | 0,8184671 |

в)

Рисунок Г.1 – Вагомість входних сигналів при навчанні багатошарової неймережі з 4-ма входами для шарів ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 1 |
| D_+1_ | 0,3851687 |
| L_+1_ | 0,3196431 |
| W_h=0-10sm_ | 0,5977252 |

а)

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P3 | 1 |
| D3 | 0,3018382 |
| L3 | 0,2509653 |
| W2 | 0,3507412 |

б)

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P3 | 0,9756274 |
| D3 | 0,9265667 |
| L3 | 1 |
| W2 | 0,7682151 |

в)

Рисунок Г.2 – Вагомість вхідних сигналів при тестуванні багатошарової неймережі з 4-ма входами для шарів ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,3636213 |
| D_+1_ | 0,08808355 |
| L_+1_ | 0,5281296 |
| W_h=0-10sm__-1_ | 0,5130497 |
| W_h=0-10sm_ | 1 |

а)

| Network3 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P3 | 0,4880818 |
| D3 | 0,4604513 |
| L3 | 0,8924811 |
| W1 | 0,9425577 |
| W2 | 1 |

б)

| Network3 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P3 | 0,5714166 |
| D3 | 0,3231202 |
| L3 | 0,7095562 |
| W1 | 0,6723397 |
| W2 | 1 |

в)

Рисунок Г.3 – Вагомість входних сигналів при навчанні багатошарової нейромережі з 5-ма входами для шарів ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,3919711 |
| D_+1_ | 0,2899244 |
| L_+1_ | 1 |
| W_h=0-10sm_-1_ | 0,5707425 |
| W_h=0-10sm_ | 0,9979905 |

а)

| Network3 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P3 | 0,4072374 |
| D3 | 0,3819952 |
| L3 | 0,7549229 |
| W1 | 0,833973 |
| W2 | 1 |

б)

| Network3 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P3 | 0,4706662 |
| D3 | 0,6839566 |
| L3 | 0,6242823 |
| W1 | 0,7388145 |
| W2 | 1 |

в)

Рисунок Г.4 – Вагомість вхідних сигналів при тестуванні багатошарової нейромережі з 5-ма входами для шарів ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

Аналіз зв'язку середнього значення всмоктуючого тиску ґрунту зі значеннями всмоктуючого тиску в різних шарах ґрунту. Проведемо аналіз зв'язку середнього значення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 0-40 см зі значеннями всмоктуючого тиску в шарах ґрунту 0-10, 10-20 і 30-40 см. При цьому використаємо дослідні дані, які використовувалися для навчання і для тестування нейронних мереж при моделюванні ненасиченої зони ґрунту. Отримано наступні результати:

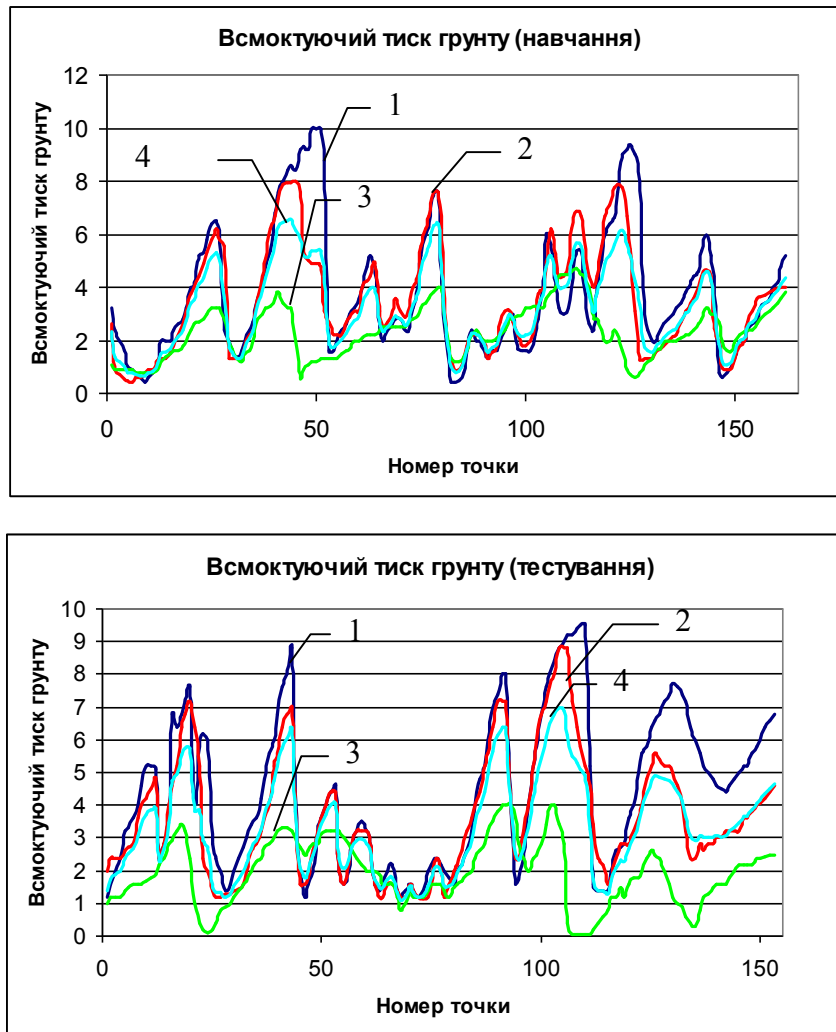


Рисунок Г.5 – Зміна всмоктуючого тиску ґрунту на навчальній та тестувальній вибірках даних:

— 1 - W ($h=0-10$ см) — 3 - W ($h=30-40$ см)
— 2 - W ($h=10-20$ см) — 4 - $W_{\text{середнє}}$

Таблиця Г.1 - Значення коефіцієнтів кореляції

| Вибірка даних | Коефіцієнти кореляції | | |
|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | $W(0-10$ см) та $W_{\text{середнє}}$ | $W(10-20$ см) та $W_{\text{середнє}}$ | $W(30-40$ см) та $W_{\text{середнє}}$ |
| моделювання (навчання) | 0,90 | 0,97 | 0,54 |
| тестування | 0,93 | 0,97 | 0,52 |

Отже, середнє значення всмоктуючого тиску ґрунту у шарі 0-40 см найкраще корелює зі значеннями всмоктуючого тиску у шарі 10-20 см, що важливо знати при потребі вимірювання середнього значення всмоктуючого тиску.

ДОДАТОК Д

Основні гідрофізичні характеристики для суглинистих ґрунтів Рівненської дослідної осушувально-зволожувальної системи

Основні гідрофізичні характеристики для суглинистих ґрунтів Рівненської дослідної ОЗС, побудовані на основі експериментальних даних, наведено на рис. (Д.1-Д.3).

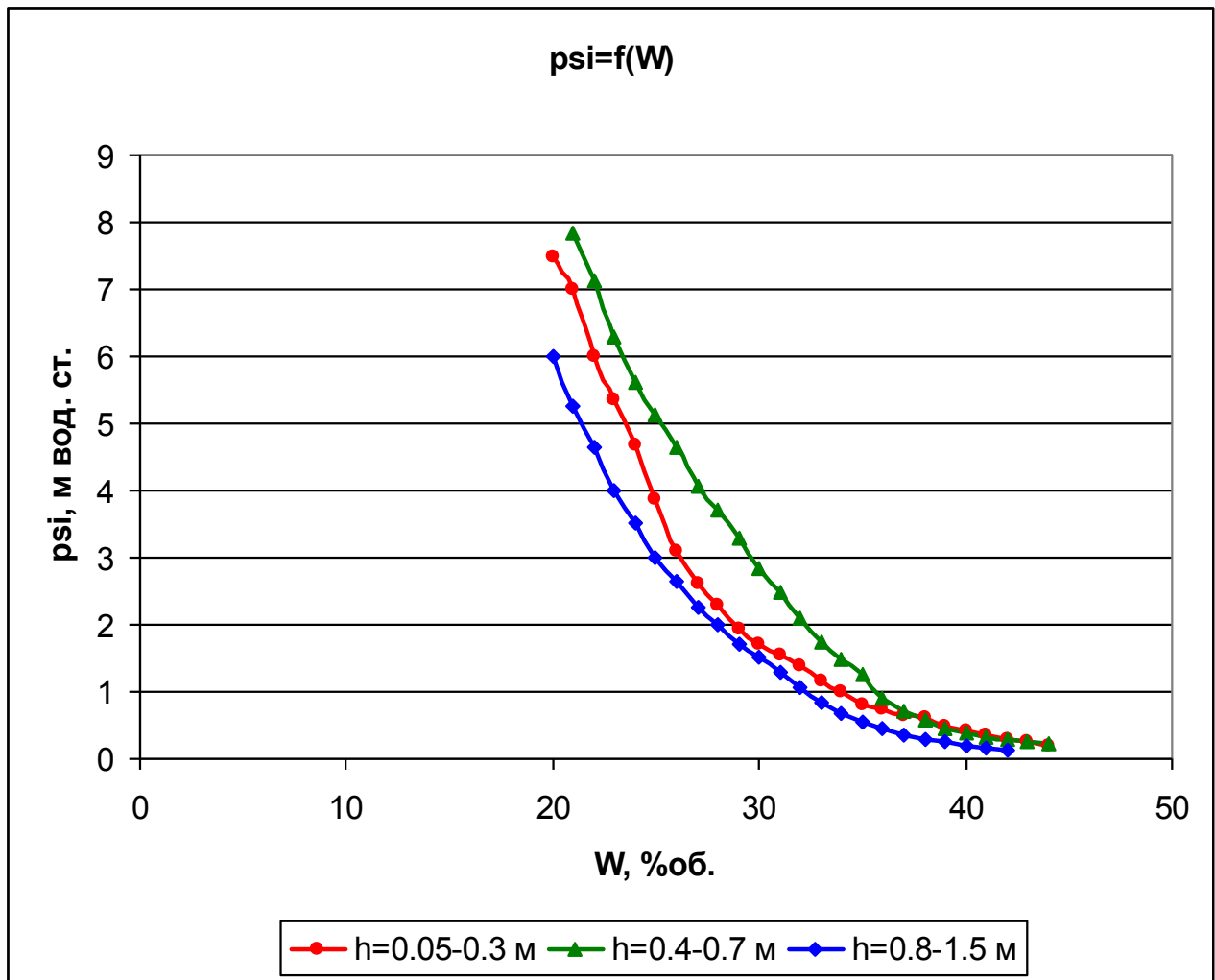


Рисунок Д.1 – Гідрофізичні характеристики суглинистих ґрунтів: залежність всмоктуючого тиску від об'ємної вологості ґрунту

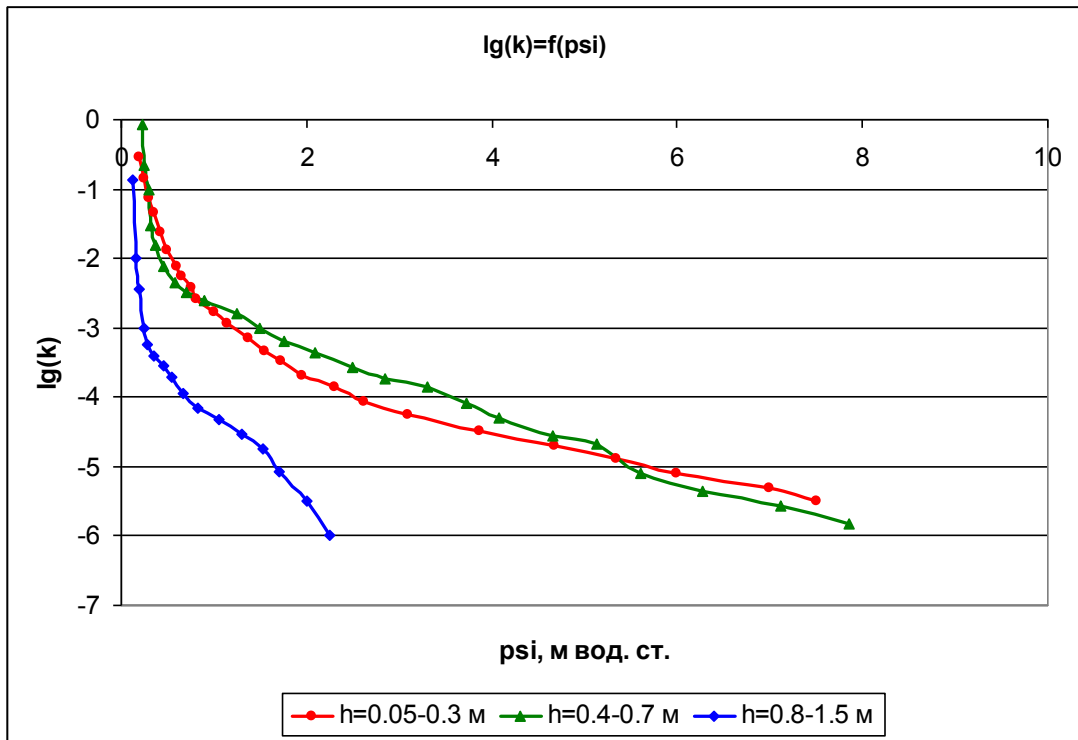


Рисунок Д.2 – Гідрофізичні характеристики суглинистих ґрунтів: залежність коефіцієнта вологопровідності від всмоктуючого тиску ґрунту

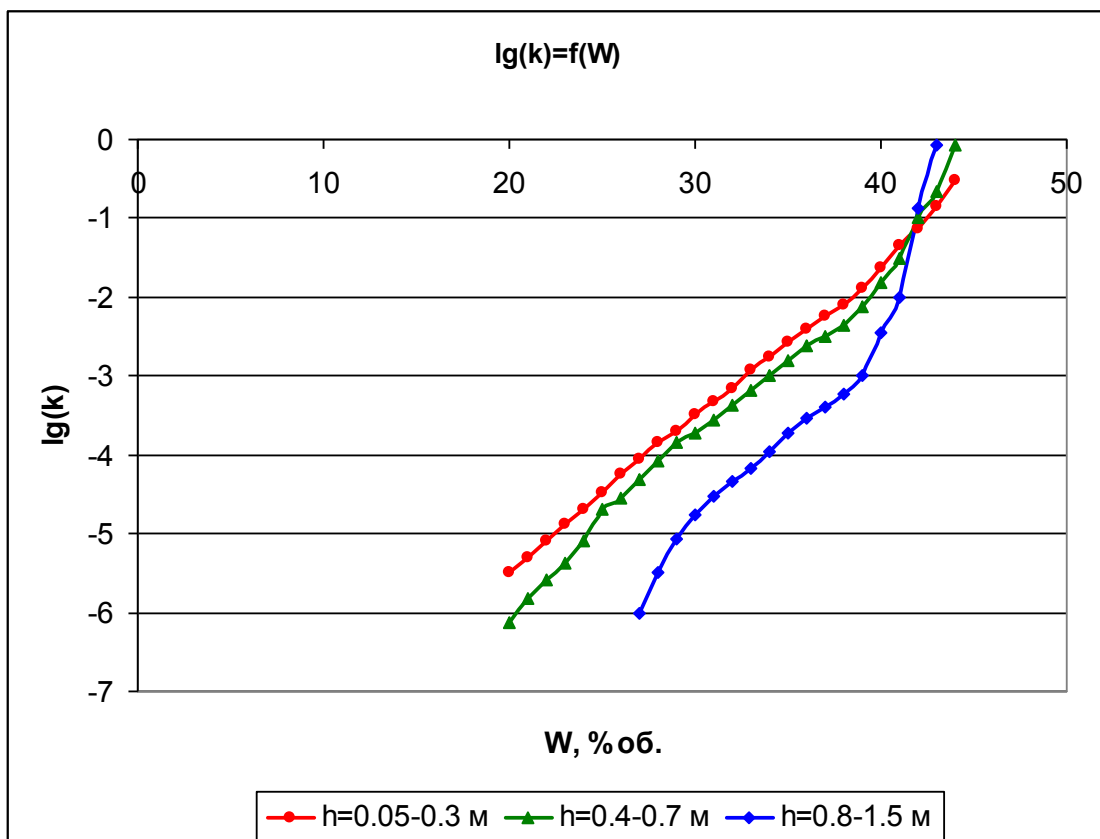


Рисунок Д.3 – Гідрофізичні характеристики суглинистих ґрунтів: залежність коефіцієнта вологопровідності від об'ємної вологості ґрунту

ДОДАТОК Е

Система основних рівнянь процесів вологопереносу в ґрунтах

Використовуючи те, що при певному виборі одиниць вимірювання гравітаційна складова повного потенціалу Φ рівні висоті z , тобто $\Phi = z - \psi_m$, одержимо рівняння для гомогенного середовища (рівняння Річардса):
відносно вологості

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} - k(\theta) \right] - I_{\theta}, \quad (\text{E.1})$$

відносно всмоктуючого тиску ґрунту

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(W) \frac{\partial \psi(W)}{\partial z} - k(W) \right] - I_W \quad (\text{E.2})$$

відоме як основне рівняння руху ґрунтової води [22].

Дане рівняння може бути використано також для опису руху води у негомогенному середовищі, тобто коли $k = k(z, \theta)$, $\psi = \psi(z, \theta)$. Очевидно, що рівняння (E.1 та E.2) не замкнуті і повинні доповнюватися співвідношеннями, що виражають залежності:

$$k = k(\theta), \quad \psi = \psi(\theta), \quad (\text{E.3})$$

індивідуальні для різних типів ґрунтів. Коли профіль ґрунту складається з кількох різних типів ґрунтів, маємо залежність:

$$k = k(z, \theta), \quad \psi = \psi(z, \theta), \quad (\text{E.4})$$

характерну для негомогенного середовища.

Таким чином, система рівнянь (E.1-E.4) забезпечує розв'язок задачі відносно вологості ґрунту. При цьому є можливість одержувати також епюри всмоктуючого тиску.

Крайові умови. Відносно рівняння вологопереносу крайові умови – граничні та початкові умови – можна сформулювати таким чином. Граничні умови на поверхні являють собою результуючий потік, що дорівнює сумі потоків:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -g(z, \tau)|_{z=0} = p - g_B - g_{IH} - g_K, \quad (\text{E.5})$$

де p - потік від випадання дощу чи поливу;

g_B - інтенсивність фізичного випаровування;

g_{IH} - інтенсивність інфільтрації в ґрунт;

g_K - потік, що йде на споживання коренями рослин, які знаходяться у верхньому горизонті ґрунту.

Оскільки в якості нижньої границі взято РГВ, то гранична умова там запишеться:

$$\theta(z, \tau)|_{z=H} = \theta_{max} = const, \quad \psi(z, \tau)|_{z=H} = 0 \quad (\text{E.6})$$

де θ_{max} або θ_H - вологість повного насичення.

В якості початкової умови прийнято розподіл вологості у початковий момент часу:

$$z > 0, \quad \theta(z, \tau)|_{\tau=0} = \theta_0(z), \quad (\text{E.7})$$

де $\theta_0(z)$ - відома функція або експериментально одержаний розподіл вологості по осі oz .

Дискретна математична модель вологопереносу в ґрунтах. Розв'язати рівняння (E.1 та E.2) у точному аналітичному вигляді при граничних умовах (E.5) та (E.6) і початкових умовах (E.7), тобто знайти розподіл вологості $\theta(z, \tau)$ як функцію глибини z і часу τ неможливо. Тому знаходять наближений розв'язок таких рівнянь переходом від неперервної моделі вологопереносу до дискретної. Нехай в деякій точці $A(z)$ розрізняється вхідний потік q_{ex} і

вихідний потік $q_{вих}$. та функція поглинання води I_θ . Тоді зміна вологості ґрунту $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ в точці $A(z)$ пропорційна миттєвій зміні потоку $\frac{\partial q}{\partial z}$ у даній точці та інтенсивності поглинання I_θ , що виражає собою фундаментальний закон збереження масив елементарному об'ємі ґрунту. Наближено розглядається деяка «елементарна комірка» на відрізку осі z , $\Delta z = [z_{i-0.5}; z_{i+0.5}]$ та на відрізку часу $\Delta \tau = [\tau_n; \tau_{n+1}]$, в якій визначені потоки балансу води.

Для переходу від неперервного рівняння вологопереносу до системи різницевих рівнянь застосовується інтегро-інтерполяційний (балансовий) метод, який зберігає баланс води в кожній комірці. Суть його в тому, що рівняння (Е.1) інтегрується у кожній комірці, спочатку по координаті z на відрізку $[z_{i-0.5}; z_{i+0.5}]$, а потім по координаті τ на відрізку $[\tau_n; \tau_{n+1}]$.

Різницеві рівняння – це рівняння балансу води у кожній розрахунковій комірці $z_i (i = 1, \dots, N)$. Різницеві рівняння, що відображають рух води в дискретних точках $\theta(z_i, \tau_n)$ у просторі і в часі ще називають скінченно-різницеви аналогами для балансового рівняння вологопереносу (Е.1) з крайовими умовами (Е.5-Е.7).

Скінченно-різницеві аналогі для балансового рівняння вологопереносу. Для чисельного розв'язання поставлених задач вологопереносу застосовують балансові різницеві схеми. На основі інтегро-інтерполяційного методу скінченно-різницеві аналогі для рівняння вологопереносу (Е.1) для кожної внутрішньої комірки мають вигляд:

$$\theta_i^{n+1} = \theta_i^n + \frac{\Delta \tau}{\Delta z} \left[k_{i+0.5}^n(\theta) \left(\frac{\psi_{i+1}^n(\theta) - \psi_i^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) - k_{i-0.5}^n(\theta) \left(\frac{\psi_i^n(\theta) - \psi_{i-1}^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) \right] - \alpha(\theta_i^n) E_i^n, \quad (E.8)$$

$$i = 2, 3, \dots, N - 1;$$

де θ_i^{n+1} , θ_i^n - вологість ґрунту в i -й комірці відповідно у наступний $n+1$ -й та попередній n -й моменти часу;

$$q_{i-0.5}^n = k_{i-0.5}^n(\theta) \left(\frac{\psi_i^n(\theta) - \psi_{i-1}^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) - \text{потік вологи в комірку (з комірки) в}$$

точці $z_{i-0.5}$ у момент часу τ_n ;

$$q_{i+0.5}^n = k_{i+0.5}^n(\theta) \left(\frac{\psi_{i+1}^n(\theta) - \psi_i^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) - \text{потік вологи в комірку (з комірки) в}$$

точці $z_{i+0.5}$ у момент часу τ_n ; $\psi_{i-1}^n(\theta)$, $\psi_i^n(\theta)$, $\psi_{i+1}^n(\theta)$ потенціали ґрунтової вологи відповідно в $i+1$, i , $i-1$ -й комірках у момент часу τ_n ;

E_i^n - сумарне випаровування в i -й комірці за час $\Delta\tau$;

$\alpha(\theta_i^n)$ - коефіцієнт редукції сумарного випаровування.

Тут значення коефіцієнтів вологопереносу розраховуються за формулою:

$$k_{i+0.5}^n(\theta) = \frac{k_{i+1}^n(\theta) + k_i^n(\theta)}{2}; \quad k_{i-0.5}^n(\theta) = \frac{k_i^n(\theta) + k_{i-1}^n(\theta)}{2}. \quad (\text{E.9})$$

Для комірки, що прилягає до поверхні ґрунту (у точці $z = z_1$), рівняння балансу вологи має вигляд:

$$\theta_i^{n+1} = \theta_1^n + \frac{\Delta\tau}{\Delta z} \left[m^n + P^n + k_{1+0.5}^n(\theta) \left(\frac{\psi_2^n(\theta) - \psi_1^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) \right] - \alpha(\theta_1^n) E_1^n, \quad (\text{E.10})$$

де m^n , P^n - відповідно опади та поливи на інтервалі $\Delta\tau$.

При $\theta = \theta_{max}$, $\psi_{N+1} = 0$ (комірка поряд із РГВ):

$$\theta_N^{n+1} = \theta_N^n + \frac{\Delta\tau}{\Delta z} \left[k_{N+0.5}^n(\theta) \left(\frac{-\psi_N^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) - k_{N-0.5}^n(\theta) \left(\frac{\psi_N^n(\theta) - \psi_{N-1}^n(\theta)}{\Delta z} - 1 \right) \right] - \alpha(\theta_N^n) E_N^n. \quad (\text{E.11})$$

Одержавши значення θ_i^{n+1} вологості ґрунту в момент часу τ_{n+1} , знаходимо значення потенціалу ґрунтової вологи та коефіцієнта вологопереносу у наступний момент часу. Так, якщо ґрунт гомогенний (однорідний), то вказані величини знаходимо за одними і тими ж формулами:

$$\psi_i^{n+1}(\theta) = \psi(\theta_i^{n+1}); \quad k_i^{n+1}(\theta) = k(\theta_i^{n+1}). \quad (\text{E.12})$$

Для негомогенних ґрунтів формули розрахунку враховують також координату z_i :

$$\psi_i^{n+1}(\theta) = \psi_{z_i}(\theta_i^{n+1}); \quad k_i^{n+1}(\theta) = k_{z_i}(\theta_i^{n+1}), \quad (\text{E.13})$$

тобто гідрофізичні функції залежать від фізичних властивостей ґрунту на глибині z .

Система різницевих рівнянь (E.8-E.11), доповнена розрахунковими формулами для потенціалу ґрунтової вологи та коефіцієнта вологопереносу (E.12-E.13), відображає динаміку руху вологи в часі і є основою для одержання розв'язку значень вологості $\theta(z_i, \tau_n)$.

Програма SWAP. Програма SWAP розроблена у Вагенінгенському університеті (Голландія) програма SWAP, яка імітує транспортування води, розчинених речовин і тепла в зоні аерації у взаємодії з розвитком рослинності. У вертикальному напрямку модель сягає від поверхні ґрунту до площини мілководних ґрунтових вод. У цій зоні процеси переносу переважно вертикальні, тому SWAP є одномірною, вертикально орієнтованою моделлю.

У горизонтальному напрямку основний фокус SWAP зосереджений у масштабі поля. Вхідна модель складається з наступних файлів: метеорологічні дані, дані про зростання сільськогосподарських культур, дані про дренаж. SWAP використовує бібліотеку TTUTIL для читання вхідних ASCII – файлів у спрощеному форматі. Вихід генерується у ASCII та у бінарні файли. Потік ґрунтових вод розраховується за рівнянням Річардса. Залежність Муалема - Ван Генухтена, з модифікацією у ненасиченій зоні, описує ґрунтові гідравлічні функції. Масштабування основних кривих зволоження і осушування описують гістерезис у функції затримування.

SWAP розглядає для транспорту розчинів основні процеси: конвекцію, дисперсію, адсорбцію та розкладання. SWAP також може бути використаний

для більш широких досліджень, що включають, наприклад, випаровування або підживлення, транспорт хімікатів, пестицидів та добрив. SWAP також може імітувати тепловий потік у ґрунті з урахуванням фактичної теплоємності та теплопровідності. Загальний модуль росту рослин WOOFOST додано для імітації фотосинтезу та росту сільськогосподарських культур.

Модель є дуже гнучкою відносно вихідних даних у верхній та нижній частинах ґрунтового профілю. Для моделювання достатньо знати, в загальному, щоденні погодні умови. Для північних регіонів з холодними погодніми умовами реалізований простий модуль нагромадження снігу. У випадку більш конкретних досліджень (наприклад, стоків чи добових параметрів транспірації) можна використати дані про випаровування та опади.

У якості вхідних файлів використовуються 4 типи файлів: головний вхідний файл (розширення *.swp); файл зростання сільськогосподарських культур (розширення *.crp); файл дренажу (розширення *.dra); метеорологічний файл (розширення *.uuu).

Основний вхідний файл та файл метеорологічних даних завжди є необхідними для виконання моделювання. Вхідний файл росту сільськогосподарських культур та дренажний файл є необов'язковими. Розширення файлів є фіксованими, винятком є метеорологічний файл, який має розширення, що відповідає останнім трьом цифрам року (наприклад 1983 дає *.983). Імена вхідних файлів можна вільно вибирати і вказати в основному файлі вводу.

Основний вхідний файл містить загальну інформацію щодо моделювання, метеорології, схеми ротації сільськогосподарських культур, зрошення, потоку ґрунтових вод, теплового потоку, транспорту розчинених речовин. Для метеорологічних даних зазвичай використовуються файли зі щоденною метеорологічною інформацією (зокрема, опади, сонячна радіація, середньодобові температури, вологість повітря тощо). У файлі сільськогосподарських культур містяться детальні дані про їх зростання (час посіву, сорт культури, індекс листової поверхні, глибина кореневої системи).

Ці дані необхідні для детального моделювання розвитку культур та асиміляції біомаси. Вхідний дренажний файл складається з двох частин. Основний розділ вхідного дренажного файлу забезпечує введення даних для дренажу канав та стоків. Розширений розділ вхідного дренажного файлу забезпечує введення даних для дренажу та моделювання рівня поверхні води.

Для запуску моделі необхідно виконати пакетний файл, що є самовиконуючим файлом *.swp файлу. Пакетний файл та *.swp файл повинні міститись в одному каталозі. *.swp файл містить назви та розташування інших вхідних файлів. Альтернативою для запуску SWAP є безпосереднє виконання файлу Swap.exe. У цьому випадку основним вхідним файлом має бути файл, названий Swap.swp, він повинен бути розміщений у тому ж каталозі, що і Swap.exe.

Результати моделювання SWAP зберігаються в загальних ASCII-файлах. Деякі з цих файлів генеруються завжди, інші ж є необов'язковими для виводу. Всі вихідні файли мають той же заголовок, що і назва проекту, вміст файлу, ім'я файлу, дату генерування, період розрахунків та глибину ґрунтового профілю. Вихідний інтервал може варіюватися від одного дня до декількох років. Деякі результати можуть бути видані в інтервалах менших за добу. Вихідні файли з остаточними значеннями змінних стану можуть бути використані в якості вхідних даних для подальшого періоду моделювання. Це може бути корисно для отримання необхідних початкових умов.

Рівняння вертикального вологопереносу (Е.1) (рівняння Річардса) має чітке фізичне значення і є об'єктивним законом руху рідини в ґрунті. Розв'язуючи його в чисельному вигляді, тобто, задаючи невеликі кроки в часі по вертикальній координаті (глибині) для окремих елементарних шарів, можна визначити розподіл вологості в ґрунтовому профілі, виходячи з початкових умов, надходження опадів і поливів, рослин, тощо. Через багатосторонність рівняння Річардса, воно використовується в програмі SWAP для ненасиченої і насиченої зони, з можливістю присутності перехідного процесу (флуктуацій) і впливом ґрунтових вод.

Нижня границя. Нижня границя одновимірної моделі SWAP одна і та ж у ненасиченій зоні або у верхній частині насиченої зони, де відбувається перехід до трьохвимірного ґрунтового потоку. Нижні граничні умови в SWAP можуть бути задані залежно від застосування і підходящий просторовий масштаб. Розрізняють три загальні типи і декілька спеціальних випадків нижніх граничних умов.

1. Умова Діріхле

Головна контрольна границя часто представляється як умова Діріхле і включає в себе накладання всмоктуючого тиску h_{bot} на нижню границю. Спеціальний випадок включає використання запису висоти РГВ. Всмоктуючий тиск на висоті РГВ ϕ_{avg} визначається як $h = 0$. Це призводить до лінійного відношення між всмоктуючими тисками на сітці вузлів над та під ϕ_{avg} :

$$h_{i+1} = -h_i \frac{\phi_{avg} - z_{i+1}}{z_i - \phi_{avg}} \quad (E.14)$$

2. Умова Ньюмана

Потік часто представляється умовою Ньюмана і включає обмеження q_{bot} на нижній границі. Оскільки модель використовує явну схему лінеаризації, співвідношення потік – РГВ підлягають умові Ньюмана, де фактичний потік обчислюється від РГВ на попередньому часовому кроці. Співвідношення між потоком і РГВ може бути отримане з моделі крайового ґрунтового потоку (Van Bakel, 1986). Декілька спеціальних опцій доступні для визначення q_{bot} :

- Нульовий нижній потік може застосовуватися, коли існує водонепроникний шар на нижній границі профілю.
- Складається часовий ряд q_{bot} .
- Розраховується q_{bot} на початку кроку як функція РГВ ϕ_{avg} попереднього кроку або шляхом інтерполяції таблично представленої функції чи з використанням експоненціальної функції:

$$q_{bot} = a_{bot} \exp(-b_{bot} \phi_{avg}), \quad (E.15)$$

де a_{bot} (м/добу) і b_{bot} (м⁻¹) – емпіричні коефіцієнти.

- Розраховується q_{bot} на початку кроку як функція РГВ ϕ_{avg} попереднього кроку, гідравлічного напору в обмеженому водоносному горизонті ϕ_{aquif} (м) і опору сусіднього шару c_1 (доба):

$$q_{bot} = \frac{\phi_{aquif} - \phi_{avg}}{c_1 + \sum_{i=i_{gwl}}^n \frac{\Delta z_i}{k_{sat,i}}} \quad (E.16)$$

Опір потоку у насиченій зоні між РГВ і нижньою границею врахований при сумуванні опорів потоку $\frac{\Delta z_i}{k_{sat,i}}$ у цій зоні. Доступні декілька варіантів визначення ϕ_{aquif} .

3. Умова Коші

Потік q на нижній границі визначається як функція всмоктуючого тиску. Дана умова може бути використана, коли моделі ненасичених потоків скомбіновані з моделями для граничного потоку від РГВ і коли необхідна неявна обробка q_{bot} в ітераційній розрахунковій схемі. Потік через нижню границю визначається різницею гідравлічного напору $(h + z)$ і напору ϕ (м) місцевого РГВ за межами потоку, описаного моделлю, поділеною на опір потоку c (доба).

$$q_{bot} = \frac{[h + z]_{z=bot} - \phi}{c} \quad (E.17)$$

4. Спеціальні умови

Дві спеціальні умови включають умову для визначення інфільтраційної поверхні на нижній границі та вільного дренажу. Інфільтраційна поверхня призначена для моделювання потоку вологи у лізіметрі і включає комбінацію умови контролю

напору і умови нульового потоку.

$$\begin{aligned} h_{z=bot} < 0 &\rightarrow q_{bot} = 0 \\ h_{z=bot} \geq 0 &\rightarrow q_{bot} = -k_n \left[\frac{\partial(h+z)}{\partial z} \right]_{z=bot} \end{aligned} \quad (E.18)$$

Вільний дренаж впливає з припущення, що градієнт гідравлічного напору дорівнює градієнту висоти напору, а отже, величина q_{bot} рівна гідравлічній провідності найнижчої ділянки:

$$\left[\frac{\partial(h+z)}{\partial z} \right]_{z=bot} = 1 \rightarrow q_{bot} = -k_n \quad (E.19)$$

Під час морозних умов q_{bot} буде модифікований згідно з

$$q_{bot} = f_T(z) \cdot q_{bot}, \quad (E.20)$$

але може бути зменшений навіть до меншого значення у випадку присутності мерзлих шарів.

Чисельний розв'язок. Точне чисельне рішення рівняння Річардса ускладнене через його гіперболічний характер, сильну нелінійність ґрунтових гідравлічних функцій (водоутримування чи ОГХ і вологопровідності) та швидку зміну граничних умов біля поверхні ґрунту. Розрахований ґрунтовий водний потік значно залежить від структури розрахункової схеми, прикладеного часу та просторової дискретизації, процедури задання граничних умов (Van Genuchten, 1982; Milly, 1985; Celia et al., 1990; Warrick, 1991; Zaidel and Russo, 1992). В моделі SWAP числова схема була вибрана так, щоб вирішувалось одномірне рівняння Річардса з точним масовим балансом, який швидко сходиться. Дана схема в комбінації із процедурою задання верхньої граничної умови показана для точного врахування швидкого руху вологи під час інфільтрації в осушених ґрунтах. У той же час, схема чисельно ефективна (Van Dam and Feddes, 2000).

Рівняння Річардса. Числові методи SWAP, що використовуються для розв'язку рівняння Річардса є неявними, зворотними методами скінченних різниць з явною лінеаризацією гідравлічних провідностей, як описано Haverkamp(1977) і Belmans(1983), але з такими умовами:

- Числові методи застосовуються, як для ненасичених, так і для насичених зон, і рівняння потоків розв'язуються одночасно в обох зонах.

- Об'ємна вологість ґрунту $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ оцінюється замість використання

апроксимації для $C \frac{\partial h}{\partial t}$, де C – вологоємність (m^{-1}).

- Наявні декілька способів обрахунку міжвузлової вологопровідності.

Неявний, зворотній метод скінченних різниць з явною лінеаризацією дає наступну дискретизацію рівняння Річардса:

$$\frac{\theta_i^{j+1} - \theta_i^j}{\Delta t^j} = \frac{1}{\Delta z_i} \cdot \left[k_{i-0.5}^{j+k} \cdot \frac{h_{i-1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{0.5(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + k_{i-0.5}^{j+k} - k_{i+0.5}^{j+k} \cdot \frac{h_i^{j+1} - h_{i+1}^{j+1}}{0.5(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})} - k_{i+0.5}^{j+k} \right] - S_{a,i}^j - S_{d,i}^j - S_{m,i}^{j+1}, \quad (E.21)$$

де $\Delta t^j = t^{j+1} - t^j$,

Δz_i - товщина шару,

h - всмоктуючий тиск ґрунту, м вод. ст.,

z - вертикальна координата, напрямлена вгору.

Умови, що представляють споживання води коріннями рослин S_a і дренажний стік S_d визначаються у попередній момент часу j (явна лінеаризація). Швидкість обміну водою по макропорам S_m визначається у новий момент часу $j+1$, міжвузлова вологопровідність $k_{i-0.5}^{j+k}$ може бути визначена, як у старий момент часу j ($k=0$), так і в новий момент часу $j+1$ ($k=1$). Міжвузлова вологопровідність $k_{i-0.5}^{j+k}$ може бути обрахована як:

$$1. \text{ Середнє арифметичне: } k_{i-0.5}^{j+k} = 0.5(k_{i-1}^{j+k} + k_i^{j+k}). \quad (E.22)$$

$$2. \text{ Зважене середнє арифметичне: } k_{i-0.5}^{j+k} = \frac{\Delta z_{i-1} \cdot k_{i-1}^{j+k} + \Delta z_i \cdot k_i^{j+k}}{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}. \quad (\text{E.23})$$

$$3. \text{ Середнє геометричне: } k_{i-0.5}^{j+k} = \sqrt{k_{i-1}^{j+k} \cdot k_i^{j+k}}. \quad (\text{E.24})$$

4. Зважене середнє геометричне:

$$k_{i-0.5}^{j+k} = \left(k_{i-1}^{j+k}\right)^{\frac{\Delta z_{i-1}}{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}} \cdot \left(k_i^{j+k}\right)^{\frac{\Delta z_i}{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}} \quad (\text{E.25})$$

Починаючи з насиченої зони, рівень ґрунтових вод просто знаходиться в $h=0$. Також може бути підвищений рівень ґрунтових вод над ущільненими шарами ґрунтового профілю. Оскільки модель SWAP намагається описати велику кількість багат шарових ґрунтів, разом із різними типами граничних умов, міжвузлова відстань може різнитись і повинна бути визначена користувачем. Розрахунки, що використовують незважене середнє арифметичне для визначення міжвузлової провідності, показують, що для точної симуляції випаровування та інфільтрації міжвузлова відстань має бути порядку одного сантиметра біля поверхні ґрунту (Van Dam and Feddes, 2000).

Дискретна форма рівняння Річардса розв'язується ітераційно, використовуючи всмоктуючі тиски, як змінні стану. Розкладання в ряд Тейлора вологості в новій ітерації, враховуючи вологість минулої ітерації визначається як:

$$\theta_i^{j+1,p+1}(h_i^{j+1}) \approx \theta_i^{j+1,p}(h_i^{j+1,p}) + (h_i^{j+1,p+1} - h_i^{j+1,p}) \frac{\partial \theta_i^{j+1,p}}{\partial h_i^{j+1,p}} + \dots + \dots \quad (\text{E.26})$$

Неврахування другого і вищих порядків ряду Тейлора дає вираз, який може замінити розбиття вологості у новому проміжку часу. Перша похідна від вологості по всмоктуючому тиску (гідравлічному напору) ідентична до вологоємності $C^{j+1,p}$. Насправді основа (апроксимація першого порядку нового приросту вологості) методу запропонованого Celia (1990) відповідає

припущенням, зробленим у процедурі ітерації Ньютон-Рафсона. Вдосконалення цього методу полягає у заданні F_i наприкінці періоду водного балансу, як функції h_i^{j+1} :

$$F_i = \frac{\Delta z_i}{\Delta t_i^j} (\theta_i^{j+1,p} - \theta_i^j) - k_{i-0.5}^{j+k,kp} \cdot \frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_i^{j+1,p}}{0.5(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} - k_{i-0.5}^{j+k,kp} +$$

$$+ k_{i+0.5}^{j+k,kp} \cdot \frac{h_i^{j+1,p} - h_{i+1}^{j+1,p}}{0.5(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})} + k_{i+0.5}^{j+k,kp} + \Delta z_i S_{a,i}^{j+k,p} + \Delta z_i S_{d,i}^j + \Delta z_i S_{m,i}^{j+1,p} \quad (E.27)$$

де верхній індекс $p+1$ вказує на p -ту ітерацію. Ця дискретна форма рівняння Річардса дозволяє просто оцінити умови, також вона гнучка до додавання h_i^{j+1} – залежного джерела і умов стоку. Вирішення системи нелінійних рівнянь чисельно передбачає знаходження коренів функції $F_i \approx 0$ для $i=1..N$. Схема ітерації Ньютон-Рафсона для системи рівнянь має вигляд:

$$\begin{pmatrix} h_1^{j+1,p+1} \\ \dots \\ h_i^{j+1,p+1} \\ \dots \\ h_n^{j+1,p+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1^{j+1,p} \\ \dots \\ h_i^{j+1,p} \\ \dots \\ h_n^{j+1,p} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial h_1^{j+1,p}} & \frac{\partial F_1}{\partial h_2^{j+1,p}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial h_1^{j+1,p}} & \frac{\partial F_2}{\partial h_2^{j+1,p}} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_i}{\partial h_{i-1}^{j+1,p}} & \frac{\partial F_i}{\partial h_i^{j+1,p}} & \frac{\partial F_i}{\partial h_{i+1}^{j+1,p}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial F_{n-1}}{\partial h_{n-1}^{j+1,p}} & \frac{\partial F_{n-1}}{\partial h_n^{j+1,p}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_n}{\partial h_{n-1}^{j+1,p}} & \frac{\partial F_n}{\partial h_n^{j+1,p}} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_i \\ \dots \\ F_n \end{pmatrix} \quad (E.28)$$

Початкові значення є результатами попередньої ітерації, на що вказує індекс p . Розв'язок другої частини правої сторони рівняння знаходиться розв'язанням тридіагональної системи рівнянь, яка може бути ефективно обрахована (Press, 1989). Коефіцієнти Якобіана є заданими 0. Якщо для знаходження гідралічних

провідностей вибрана опція неявного обрахунку ($\kappa=1$), то також повинен бути врахований вплив часткових похідних від міжвузлової провідності по всмоктуючому тиску. Вирази для цих умов задані в 0.

Метод Ньютона для обчислення нелінійних рівнянь може значно відрізнятись від реальних значень, якщо початкові припущення є не досить точними [74]. Вплив початкової оцінки на проміжне рішення методом апроксимації першого порядку знаходження коренів наведено на рис. Е.1.

Рішення другої частини правої сторони рівняння. (Е.28) посилається на крок Ньютона h_i^{j+1} (Е.29).

$$\begin{pmatrix} h_1^{j+1,p+1} \\ \dots \\ h_i^{j+1,p+1} \\ \dots \\ h_n^{j+1,p+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1^{j+1,p} \\ \dots \\ h_i^{j+1,p} \\ \dots \\ h_n^{j+1,p} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} \Delta h_1^{j+1,p} \\ \dots \\ \Delta h_i^{j+1,p} \\ \dots \\ \Delta h_n^{j+1,p} \end{pmatrix} \quad (\text{Е.29})$$

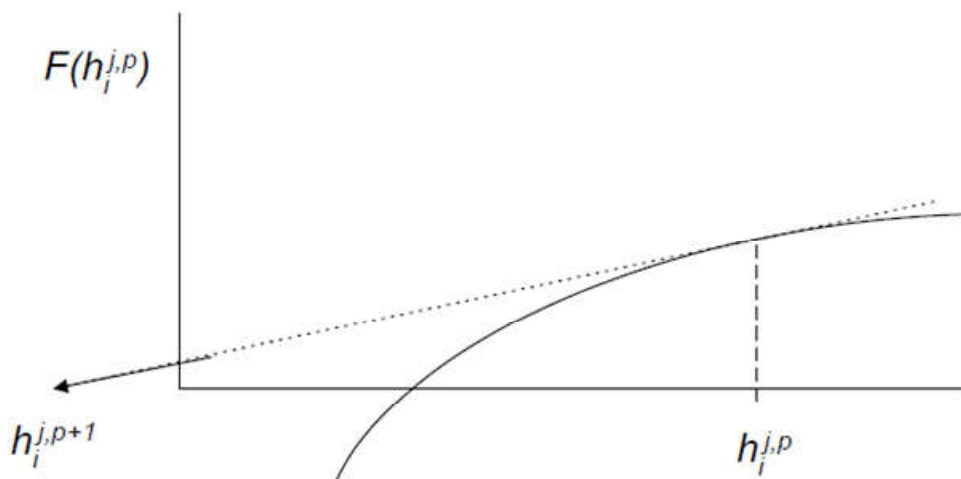


Рисунок Е.1 – Вплив початкової оцінки на проміжне рішення методом апроксимації першого порядку знаходження коренів

Ми завжди намагаємось спершу виконати повний крок Ньютона і перевіряємо у кожній ітерації чи крок зменшується на $0.5 \sum_{i=1}^n F_i^2$. Якщо ні, то ми

відходимо вздовж напрямку Ньютона, поки не знайдемо прийнятний крок. Ціль такого процесу – знайти λ , що є результатом зменшення

$$0.5 \sum_{i=1}^n \left[F_i \left(h_i^{j+1,p} + \lambda \Delta h_i^{j+1,p} \right) \right]^2.$$

Перше наближення для λ рівне 1. Якщо необхідне

друге наближення, то λ приймається як 1/3. Третє наближення рівне 1/9. Після цього не виконують подальшого зменшення λ , і виконується новий крок ітерації Ньютона.

В SWAP основний критерій збіжності у ненасиченій зоні заснований на «умові замикання води» водного балансу F. Якщо $|F_i|$ є меншим за заданий користувачем критерій для всіх частинок, то вважається, що цикл ітерації привів до досить точного розв'язку.

Чисельна реалізація граничних умов. Верхня гранична умова. Підходящі критерії для процедури відносно верхньої граничної умови є важливими для точної симуляції швидкозмінних водних потоків біля поверхні ґрунту. Це, наприклад, випадок з інфільтрацією та стоком протягом інтенсивних дощів або коли ґрунт інколи затоплює у ділянках з невеликим рівнем ґрунтових вод. Коли погода і вологість ґрунту є помірними, верхня гранична умова буде залежати від потоку. При дуже вологих чи дуже сухих умовах домінуючим є всмоктуючий тиск на поверхні ґрунту.

У випадку, коли верхня гранична умова визначається значенням потоку, умова $-k_{i-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_i^{j+1,p}}{0.5(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + 1 \right)$ замінюється потоком через поверхню ґрунту

q_{top} (м/добу), що дає наступний вираз:

$$F_1 = \frac{\Delta z_1}{\Delta t^j} (\theta_1^{j+1} - \theta_1^j) + q_{top} + k_{1/2}^{j+k} \frac{h_1^{j+1} - h_2^{j+1}}{0.5(\Delta z_1 + \Delta z_2)} + k_{1/2}^{j+k} + \Delta z_1 S_{a,1}^{j+k} + \Delta z_1 S_{d,1}^j + \Delta z_1 S_{m,1}^{j+1},$$

(E.30)

де q_{top} розраховується з факторів зовнішнього впливу, таких як сітка опадів (q_{prec}), іригація (q_{irri}), танення снігу (q_{melt}), приток води із сусідніх полів (q_{runon}) і затоплення із сусідніх водойм (q_{inun}).

$$q_{top} = -q_{prec} - q_{irri} - q_{melt} - q_{runon} - q_{inun} \quad (E.31)$$

У випадку, коли верхня гранична умова визначається всмоктуючим тиском на

поверхні ґрунту, умова $-k_{i-0.5}^{j+k, kp} \left(\frac{h_{i-1}^{j+1, p} - h_i^{j+1, p}}{0.5(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + 1 \right)$ заміниться на вираз $-k_{0.5}^{j+1} \left(\frac{h_0^{j+1} - h_1^{j+1}}{0.5(\Delta z_1)} + 1 \right)$, де h_0^{j+1} - всмоктуючий тиск на поверхні ґрунту у

наступний момент часу. Міжвузлова провідність $k_{0.5}^{j+1}$ завжди розраховується неявно. З кожною ітерацією, а також із кожним зворотнім циклом,

перевіряється чи комбінація q_{top} та h_1^{j+1} дасть $h_1^{j+1} - 0.5(\Delta z_1) \left(\frac{q_{top}}{k_{0.5}^{j+1}} + 1 \right) > 0$. В

такому випадку приймається, що головна гранична умова зберігається і водний баланс, так званого затопленого шару обраховується, включаючи стік з поверхні і глибину затоплення у момент часу $j+1$. Значення h_0^{j+1} встановлюється на глибині затоплення у момент часу $j+1$. Водний баланс затопленого шару має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{h_0^{j+1} - h_0^j}{\Delta t} = & -k_{0.5}^{j+1} \left(\frac{h_0^{j+1} - h_1^{j+1}}{0.5(\Delta z_1)} + 1 \right) + q_{prec} + q_{irri} + \\ & + q_{melt} + q_{runon} + q_{inun} - q_{e,pond} - q_{runoff} - I_{ru} \end{aligned} \quad (E.32)$$

де I_{ru} - стік через макропори.

Стік з поверхні q_{runon} задається як функція від висоти затоплення:

$$\begin{aligned} h_0^{j+1} \leq h_{0,threshold} & \quad q_{runoff} = 0 \\ h_0^{j+1} > h_{0,threshold} & \quad q_{runoff} = \alpha \left(h_0^{j+1} - h_{0,threshold} \right)^\beta, \end{aligned} \quad (E.33)$$

де α і β – коефіцієнти рівняння стоку з поверхні, що використовуються в моделі SWAP.

Підстановка виразу стоку з поверхні у рівняння водного балансу для затоплених шарів дає вираз, що розв'язується в ітераційній процедурі:

$$\begin{aligned} h_0^{j+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{k_{0.5}^{j+1}}{0.5(\Delta z_1)} \right) + \alpha \left(h_0^{j+1} - h_{0,threshold} \right)^\beta = \\ = \frac{h_0^j}{\Delta t} + \frac{k_{0.5}^{j+1}}{0.5(\Delta z_1)} h_1^{j+1} - k_{0.5}^{j+1} + q_{prec} + q_{melt} + q_{runon} - q_{e,pond} - I_{ru} \end{aligned} \quad (E.34)$$

Нижня гранична умова. Модель SWAP пропонує декілька опцій, щоб описати залежність між насиченими верхніми шарами ґрунту та вологою в глибині ґрунтового профілю. Тому окрім потокозалежної та напорозалежної умов, доступними є також комбінації базових типів граничних умов:

- попередньо заданий рівень ґрунтових вод;
- нижня гранична умова задана залежностями Коші;
- вільний дренаж;
- вільний стік.

Потокозалежна гранична умова. Для $i=n$, умова

$k_{i+0.5}^{j+k, kp} \left(\frac{h_i^{j+1, p} - h_{i+1}^{j+1, p}}{0.5(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})} + 1 \right)$ у (E.28) замінюється на $-q_{bot}$, отримаємо:

$$F_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta t^j} \left(\theta_n^{j+1} - \theta_n^j \right) - k_{n-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n-1}^{j+k} - h_n^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n-1} + \Delta z_n)} + 1 \right) - q_{bot} + \Delta z_n \left(S_{a,n}^{j+k} + S_{d,n}^j + S_{m,n}^{j+1} \right) \quad (E.35)$$

Крім потокової граничної умови, модель SWAP має опції для обчислення потоків в залежності від рівня ґрунтових вод. Потік може бути сформульований як експоненціальна функція рівня ґрунтових вод або як різниця між рівнем ґрунтових вод і гідравлічним напором в глибоко залягаючих підземних водах за межами області течії, поділеній на опір потоку. Такий потік обчислюється в явному вигляді на початку поточного часового кроку і розглядається як умова задання потоку в чисельній схемі.

Напорозалежна гранична умова. Для $i = n$ $\Delta z_{i+1} = 0$ і $h_{i+1}^{j+1,p} = h_{bot}$, отримаємо:

$$F_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta t^j} (\theta_n^{j+1} - \theta_n^j) - k_{n-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n-1}^{j+1} - h_n^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n-1} + \Delta z_n)} + 1 \right) + k_{n+0.5}^{j+k} \left(\frac{h_n^{j+1} - h_{bot}}{0.5\Delta z_n} + 1 \right) + \Delta z_n (S_{a,n}^{j+k} + S_{d,n}^j + S_{m,n}^{j+1}) \quad (E.36)$$

Попередньо заданий рівень ґрунтових вод. Спочатку знаходять найнижчу частково ненасичену ділянку ґрунту і називають її n^* . Тоді розв'язується система n^* нелінійних рівнянь для $F(h)$ для ненасичених ділянок. Нижня гранична умова для цієї системи рівнянь визначається наступним чином:

$$F_{n^*} = \frac{\Delta z_{n^*}}{\Delta t^j} (\theta_{n^*}^{j+1} - \theta_{n^*}^j) - k_{n^*-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n^*-1}^{j+1} - h_{n^*}^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n^*-1} + \Delta z_{n^*})} + 1 \right) + k_{n^*+0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n^*}^{j+1} - h_{n^*+1}^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n^*} + \Delta z_{n^*+1})} + 1 \right) + \Delta z_{n^*} (S_{a,n^*}^{j+k} + S_{d,n^*}^j + S_{m,n^*}^{j+1}) \quad (E.37)$$

РГВ знаходиться між вузловими точками n^* та $n^* + 1$. Всмоктуючий тиск вузла $n^* + 1$ апроксимується $h_{n^*}^{j+1}$ таким чином:

$$h_{n^*+1}^{j+1} = -h_{n^*}^{j+1} \frac{gwl - z_{n^*+1}}{z_{n^*} - gwl}, \quad (\text{E.38})$$

де z_n – висота вузла у ділянці n^* ,

gwl – рівень ґрунтових вод.

Підстановкою у рівняння (E.29) отримаємо:

$$F_{n^*} = \frac{\Delta z_{n^*}}{\Delta t^j} (\theta_{n^*}^{j+1} - \theta_{n^*}^j) - k_{n^*-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n^*-1}^{j+1} - h_{n^*}^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n^*-1} + \Delta z_{n^*})} + 1 \right) + k_{n^*+0.5}^{j+k} + k_{n^*+0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n^*}^{j+1} \left(\frac{z_{n^*} - z_{n^*+1}}{z_{n^*} - gwl} \right)}{0.5(\Delta z_{n^*} + \Delta z_{n^*+1})} + 1 \right) + \Delta z_n (S_{a,n^*}^{j+k} + S_{d,n^*}^j + S_{m,n^*}^{j+1}) \quad (\text{E.39})$$

Потім ітераціями розв’язується система рівнянь для $i \leq n^*$, профіль всмоктуючого тиску вузлів $i > n^*$ розраховується виходячи з всмоктуючих тисків двох сусідніх вище стоячих вузлів:

$$h_{i+1}^{j+1} = h_i^{j+1} \left(1 + \frac{k_{i-0.5}^{j+k} (\Delta z_i + \Delta z_{i+1})}{k_{i+0.5}^{j+k} (\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} \right) - h_{i-1}^{j+1} \frac{k_{i-0.5}^{j+k} (\Delta z_i + \Delta z_{i+1})}{k_{i+0.5}^{j+k} (\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + 0.5(\Delta z_i + \Delta z_{i+1}) \left(1 - \frac{k_{i-0.5}^{j+k}}{k_{i+0.5}^{j+k}} \right) + \frac{0.5(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})}{k_{i+0.5}^{j+k}} \left(\frac{\Delta z_i}{\Delta t^j} (\theta_{sat,i} - \theta_i^j) + \Delta z_i (S_{a,i}^{j+k} + S_{d,i}^j + S_{m,i}^{j+1}) \right) \quad (\text{E.40})$$

Відношення Коші для нижньої границі. Потік через нижню границю визначається через різницю гідравлічного напору на нижній границі і гідравлічного напору φ (м) місцевого РГВ, визначеного користувачем, поділену на опір напору $c(d)$. Гідравлічний напір на нижній границі

апроксимується всмоктуючим тиском у найнижчому вузлі плюс підняття напору вузла n .

$$q_{bot} = \frac{h_n^{j+1} + z_n - \varphi}{\frac{0.5\Delta z_n}{k_{n+0.5}^{j+k}} + c} \quad (\text{E.41})$$

Підстановкою у рівняння (E.29) отримаємо:

$$F_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta t^j} (\theta_n^{j+1} - \theta_n^j) - k_{n-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n-1}^{j+1} - h_n^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n-1} + \Delta z_n)} + 1 \right) + \quad (\text{E.42})$$

$$+ k_{n+0.5}^{j+k} \frac{h_n^{j+1} - (\varphi - z_n)}{0.5\Delta z_n + ck_{n+0.5}^{j+k}} + \Delta z_n (S_{a,n}^{j+k} + S_{d,n}^j + S_{m,n}^{j+1})$$

Інфільтрація. Опція інфільтрації використовується для моделювання потоку води у лізиметрі з відкритим виходом вниз. Ніякого відтоку не відбувається, якщо нижній шар ґрунту все ще ненасичений. З моменту, як опір потоку на виході зовсім незначний, додатні значення всмоктуючих тисків не будуть наростати вниз, коли ґрунтові води просочуються донизу. В межах ітераційного циклу для розрахунку чисельного виразу рівняння Річардса, перевіряється, яка з граничних умов, за потоком чи за всмоктуючим тиском, переважає. Якщо $h_n^{j+1} + 0.5\Delta z_n < 0$ нижній потік q_{bot} встановлюється в нуль, але якщо $h_n^{j+1} + 0.5\Delta z_n$ прямує до значення більше нуля, тиск вниз встановлюється в нуль ($h_{bot} = 0$). Числове представлення має вигляд:

$$h_n^{j+1} + 0.5\Delta z_n < 0 \rightarrow F_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta t^j} (\theta_n^{j+1} - \theta_n^j) - k_{n-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n-1}^{j+1} - h_n^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n-1} + \Delta z_n)} + 1 \right) + \quad (\text{E.43})$$

$$+ \Delta z_n (S_{a,n}^{j+k} + S_{d,n}^j + S_{m,n}^{j+1})$$

$$\begin{aligned}
h_n^{j+1} + 0.5\Delta z_n \geq 0 \rightarrow F_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta t^j} (\theta_n^{j+1} - \theta_n^j) - k_{n-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n-1}^{j+1} - h_n^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n-1} + \Delta z_n)} + 1 \right) + \\
+ k_{n+0.5}^{j+k} \left(\frac{h_n^{j+1}}{0.5\Delta z_n} + 1 \right) + \Delta z_n (S_{a,n}^{j+k} + S_{d,n}^j + S_{m,n}^{j+1})
\end{aligned} \tag{E.44}$$

Вільний дренаж. Опція вільного дренажу підходить для ґрунтових профілів, у яких рівень ґрунтових вод знаходиться досить глибоко. Нижній потік спричинений виключно гравітацією, градієнт гідравлічного напору рівні нулю:

$$q_{bot} = -k_{n+0.5}^{j+1} \left(\left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)_{n+0.5} + 1 \right) \rightarrow q_{bot} = -k_{n+0.5}^{j+1} \tag{E.45}$$

Підставимо у рівняння (E.29), отримаємо:

$$\begin{aligned}
F_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta t^j} (\theta_n^{j+1} - \theta_n^j) - k_{n-0.5}^{j+k} \left(\frac{h_{n-1}^{j+1} - h_n^{j+1}}{0.5(\Delta z_{n-1} + \Delta z_n)} + 1 \right) + k_{n+0.5}^{j+1} + \\
+ \Delta z_n (S_{a,n}^{j+k} + S_{d,n}^j + S_{m,n}^{j+1})
\end{aligned} \tag{E.46}$$

ДОДАТОК Ж

Вагомість вхідних сигналів при навчанні та тестуванні нейрорегуляторів

| Network1 - значимість входов | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,2420882 |
| D_+1_ | 0,1344925 |
| L | 1 |
| W_h=0-10sm__+1_ | 0,3075257 |

а)

| Network1 - значимість входов | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,2082395 |
| D_+1_ | 0,0887714 |
| L | 1 |
| W_h=10-20sm__+1_ | 0,2421521 |

б)

| Network1 - значимість входов | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,1205416 |
| D_+1_ | 0,08195686 |
| L | 1 |
| W_h=30-40sm__+1_ | 0,1676543 |

в)

Рисунок Ж.1 – Вагомість вхідних сигналів при навчанні багат шарової нейромережі з 4-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

| Network1 - значимость входов | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимость |
| P_+1_ | 0,5959789 |
| D_+1_ | 0,4999267 |
| L | 1 |
| W_h=0-10sm__+1_ | 0,5905637 |

а)

| Network1 - значимость входов | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимость |
| P_+1_ | 0,3489077 |
| D_+1_ | 0,2301597 |
| L | 1 |
| W_h=10-20sm__+1_ | 0,5464034 |

б)

| Network1 - значимость входов | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимость |
| P_+1_ | 0,465482 |
| D_+1_ | 0,4375903 |
| L | 1 |
| W_h=30-40sm__+1_ | 0,916299 |

в)

Рисунок Ж.2 – Вагомість вхідних сигналів при тестуванні багатошарової нейромережі з 4-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,4394579 |
| D_+1_ | 0,1260762 |
| L_-1_ | 0,7170516 |
| L | 1 |
| W_h=0-10sm_+1_ | 0,3618294 |

а)

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,2865796 |
| D_+1_ | 0,2409711 |
| L_-1_ | 0,5284489 |
| L | 1 |
| W_h=10-20sm_+1_ | 0,1966068 |

б)

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,301017 |
| D_+1_ | 0,09846509 |
| L_-1_ | 0,5120196 |
| L | 1 |
| W_h=30-40sm_+1_ | 0,2103771 |

в)

Рисунок Ж.3 – Вагомість вхідних сигналів при навчанні багат шарової нейромережі з 5-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,5933347 |
| D_+1_ | 0,2563554 |
| L_-1_ | 0,5532941 |
| L | 1 |
| W_h=0-10sm_+1_ | 0,4183675 |

а)

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,2910763 |
| D_+1_ | 0,3371771 |
| L_-1_ | 0,3136906 |
| L | 1 |
| W_h=10-20sm_+1_ | 0,2093216 |

б)

| Network1 - значимість входів | |
|------------------------------|------------|
| Сигнал | Значимість |
| P_+1_ | 0,8375998 |
| D_+1_ | 0,1825877 |
| L_-1_ | 0,7598785 |
| L | 1 |
| W_h=30-40sm_+1_ | 0,7271882 |

в)

Рисунок Ж.4 – Вагомість вхідних сигналів при тестуванні багатошарової неймережі з 5-ма входами для визначення РГВ для підтримки необхідного всмоктуючого тиску у шарах ґрунту: а – $h=0-10$ см, б – $h=10-20$ см, в – $h=30-40$ см

ДОДАТОК И

Схеми для моделювання автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю

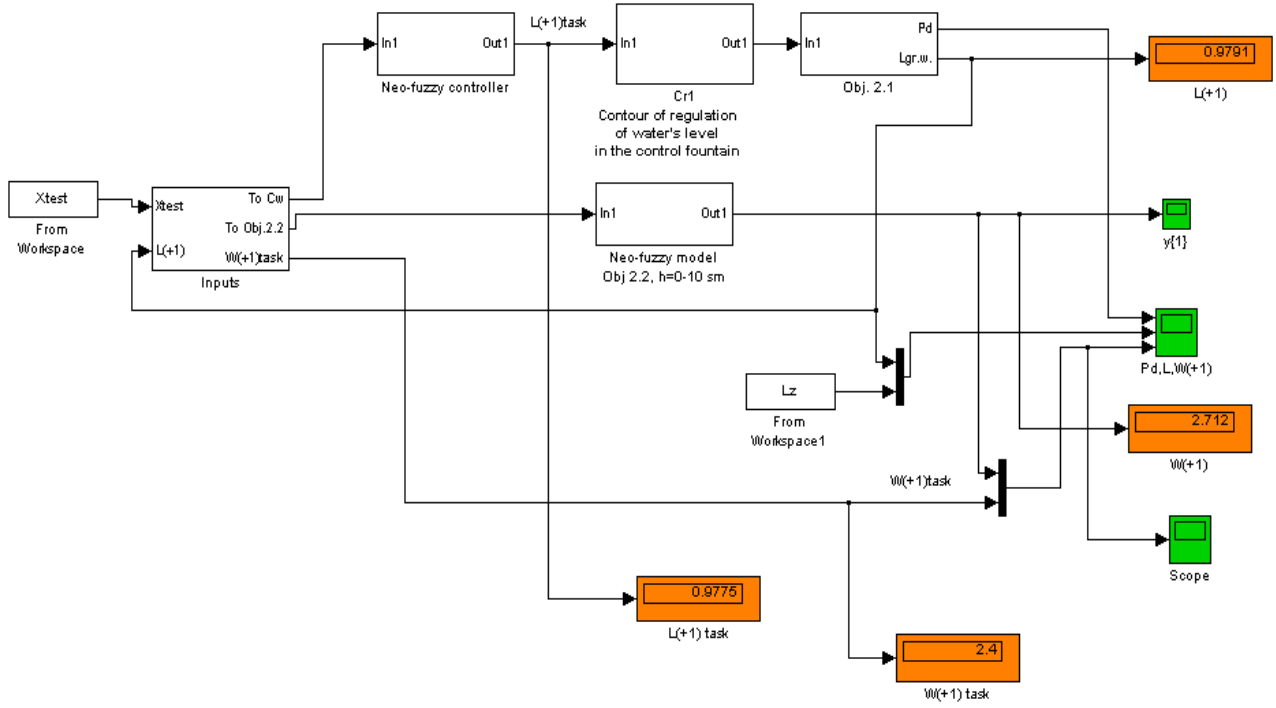


Рисунок И.1 – Структурна схема АСК вологозабезпеченістю

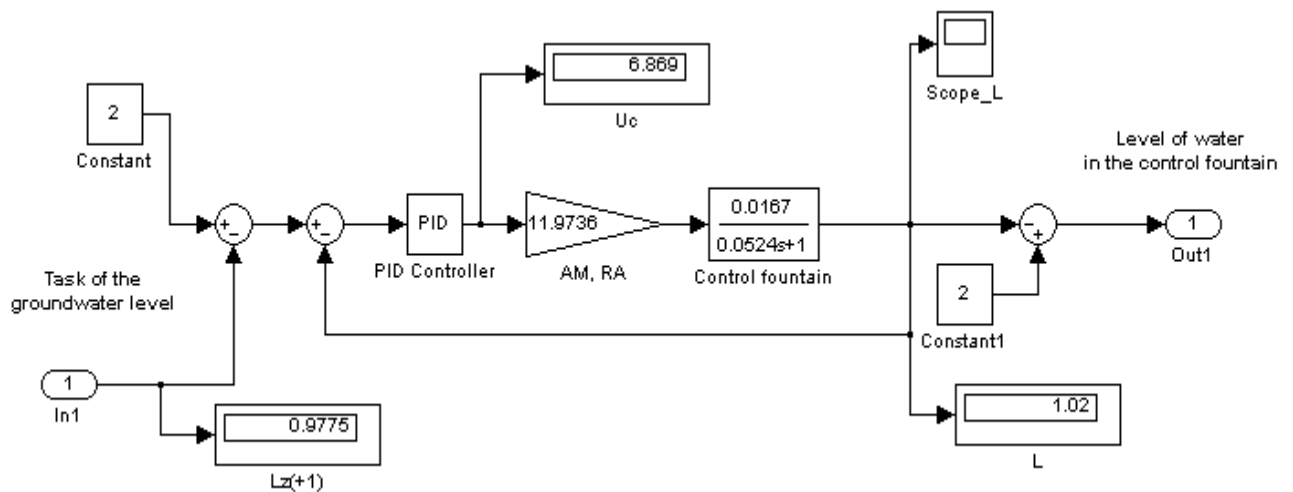


Рисунок И.2 – Внутрішній контур керування рівнем води у керуючому колодязі

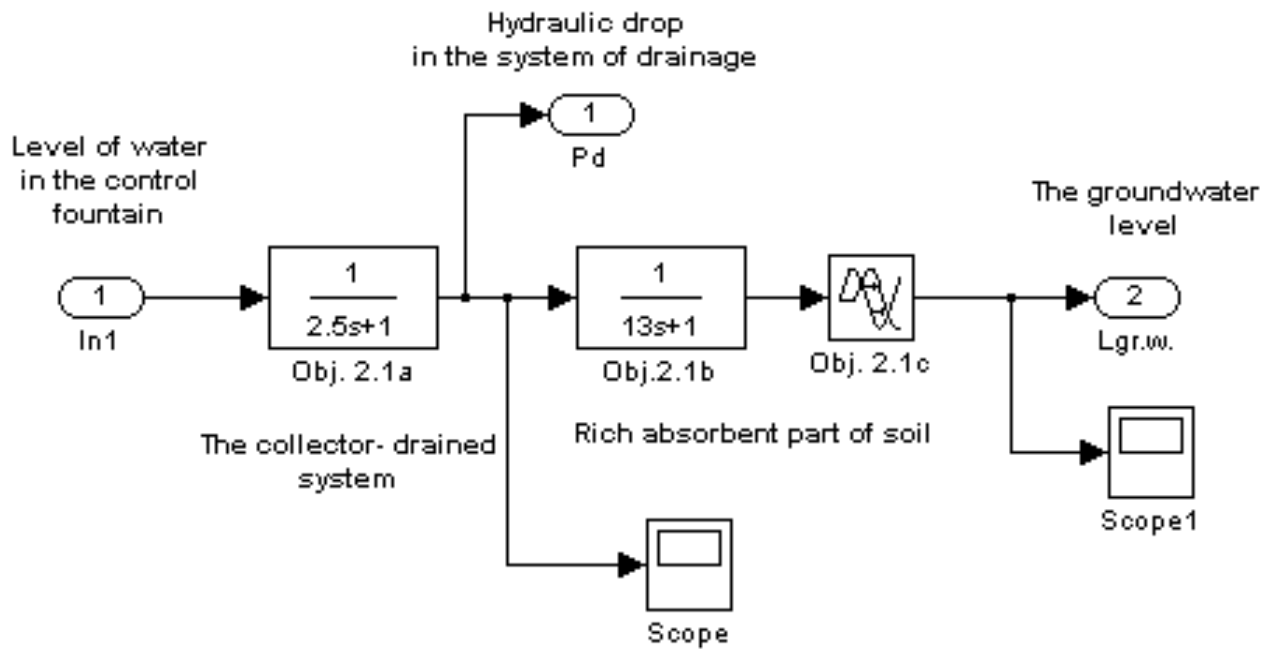


Рисунок И.3 – Об'єкт керування, що відображає колекторно-дренажну систему та насичену зону ґрунту

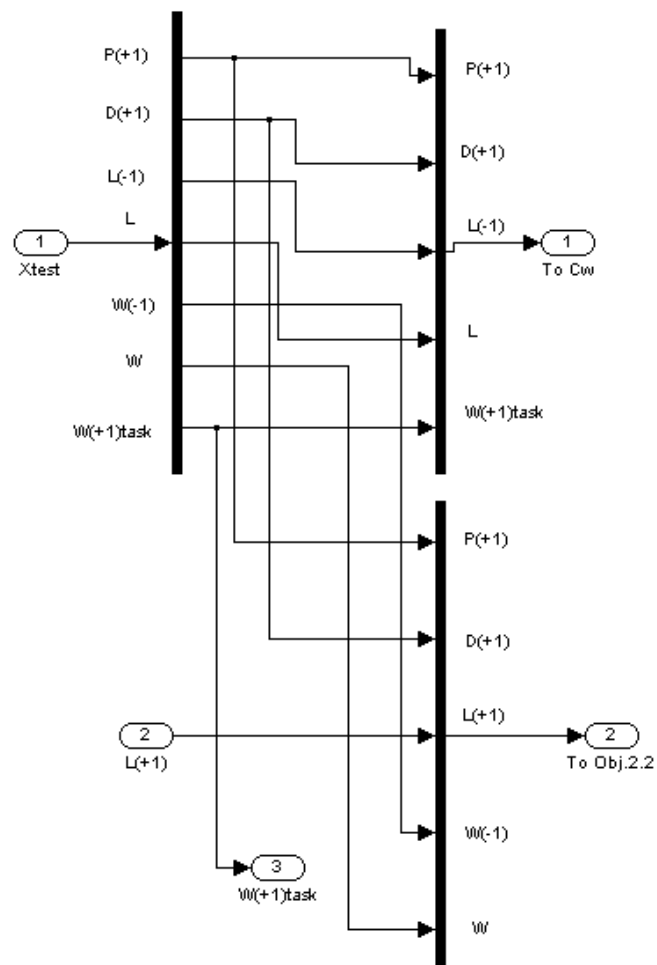


Рисунок И.4 – Входи АСК вологозабезпеченістю

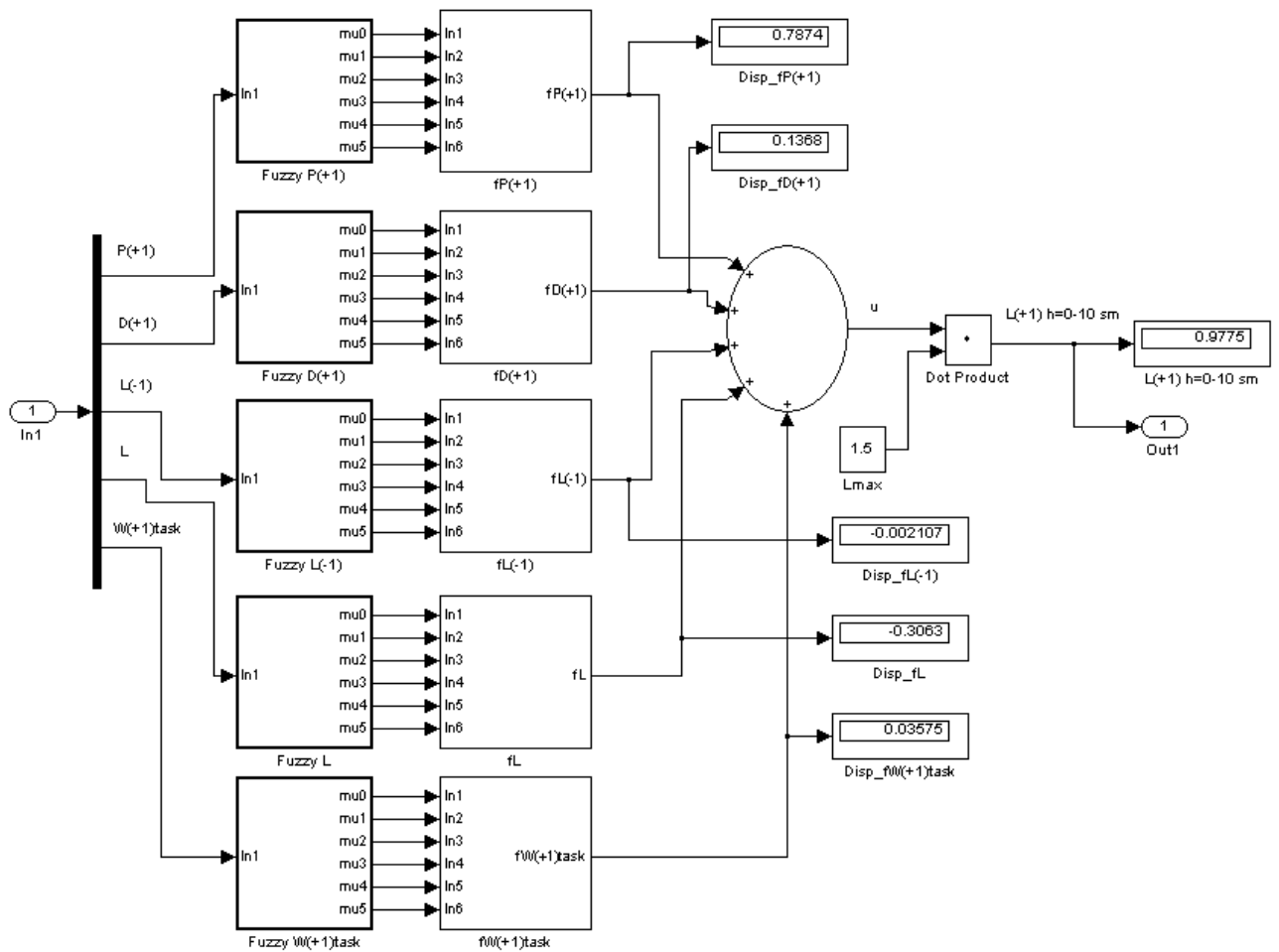


Рисунок И.5 – Структура нео-фаззі регулятора рівня

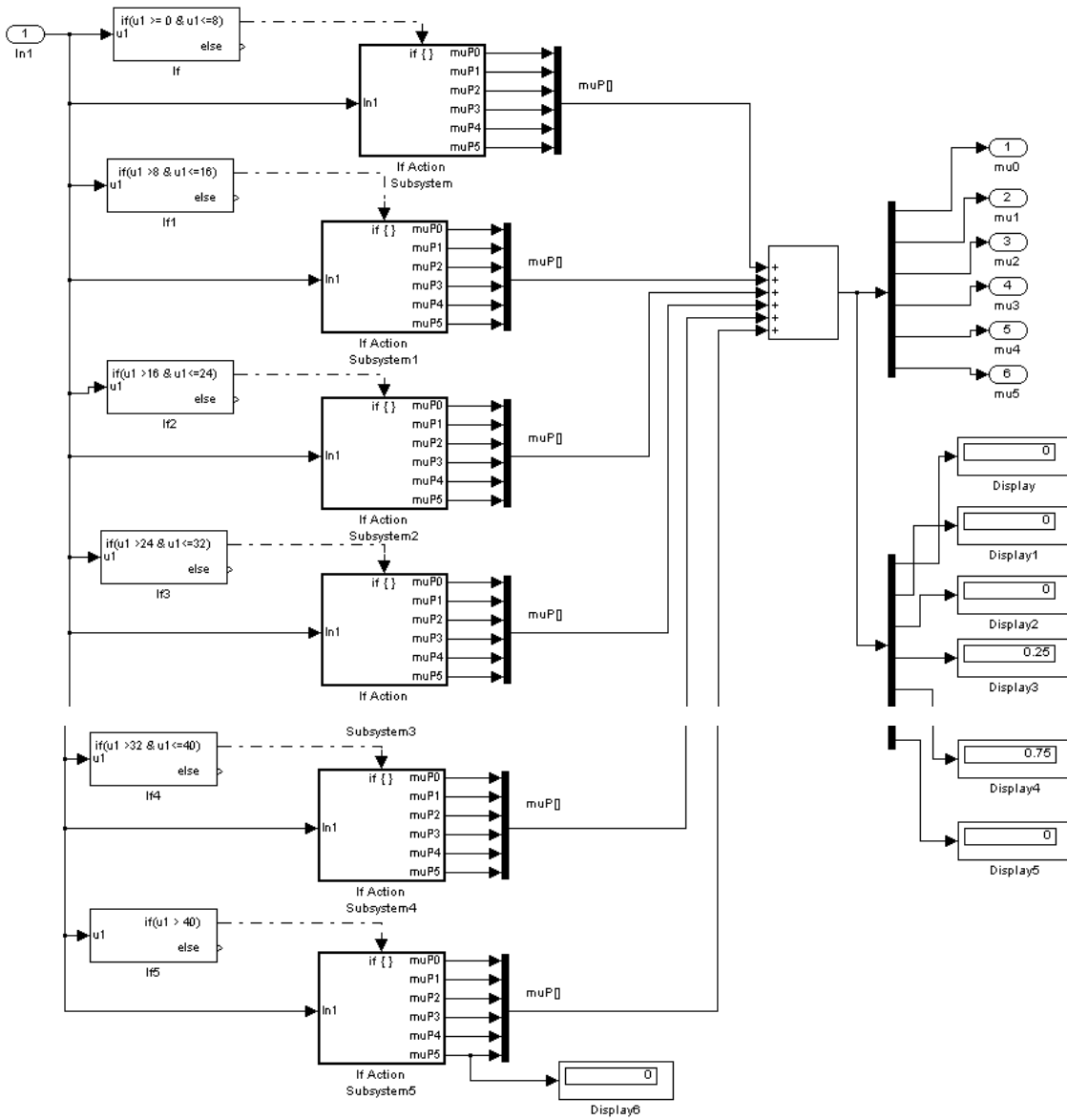
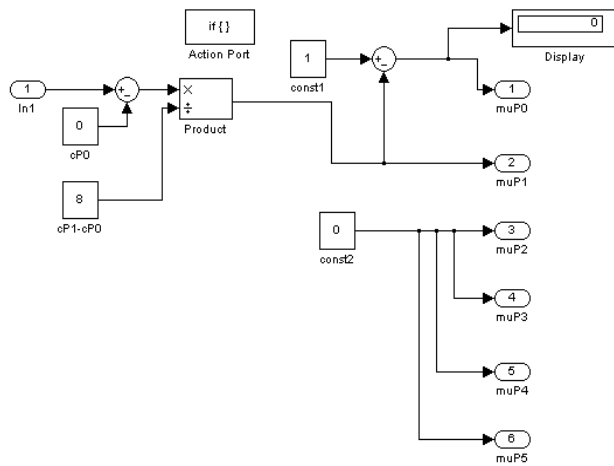
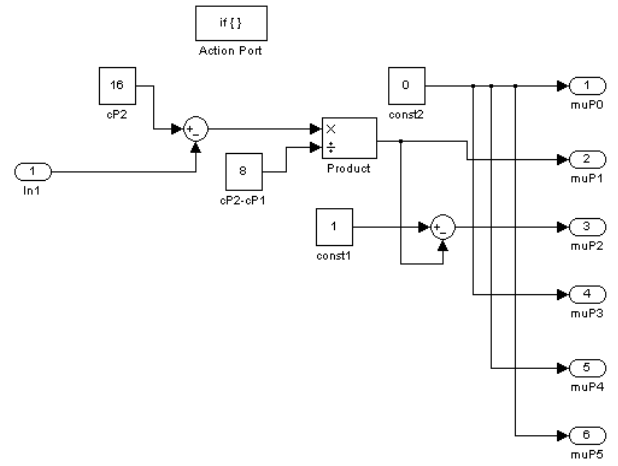


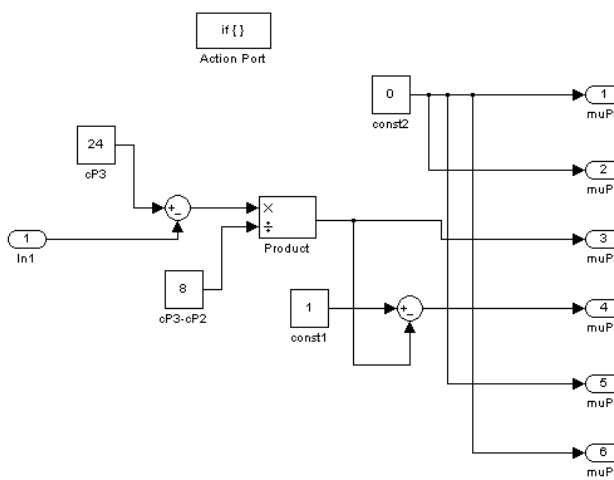
Рисунок И.6 – Фаззифікація змінної «прогнозована кількість опадів P(+1)»



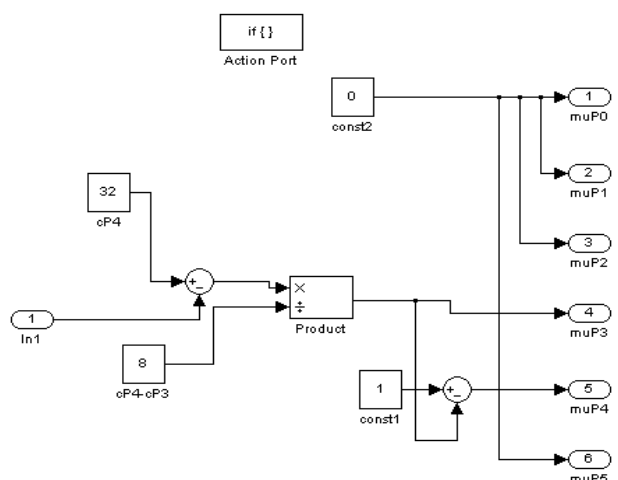
а)



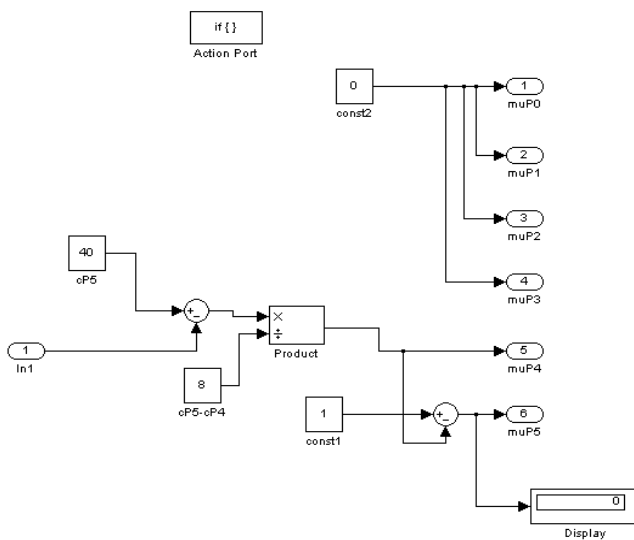
б)



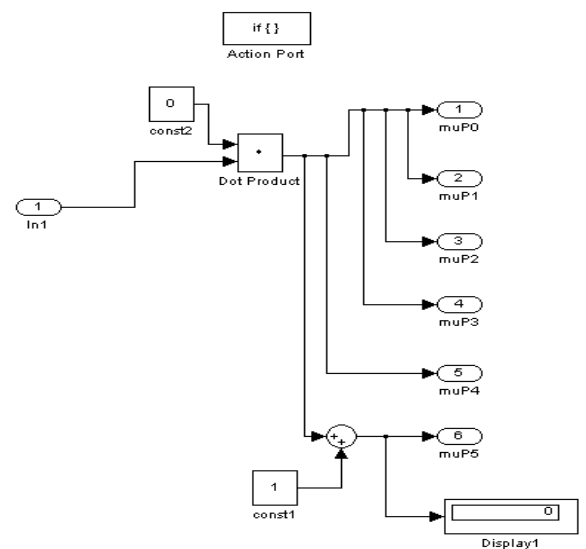
в)



г)



д)



е)

Рисунок И.7 – Фаззифікація змінної «прогнозована кількість опадів $P(+1)$ »: розрахунок функцій належності для різних діапазонів змінної: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6

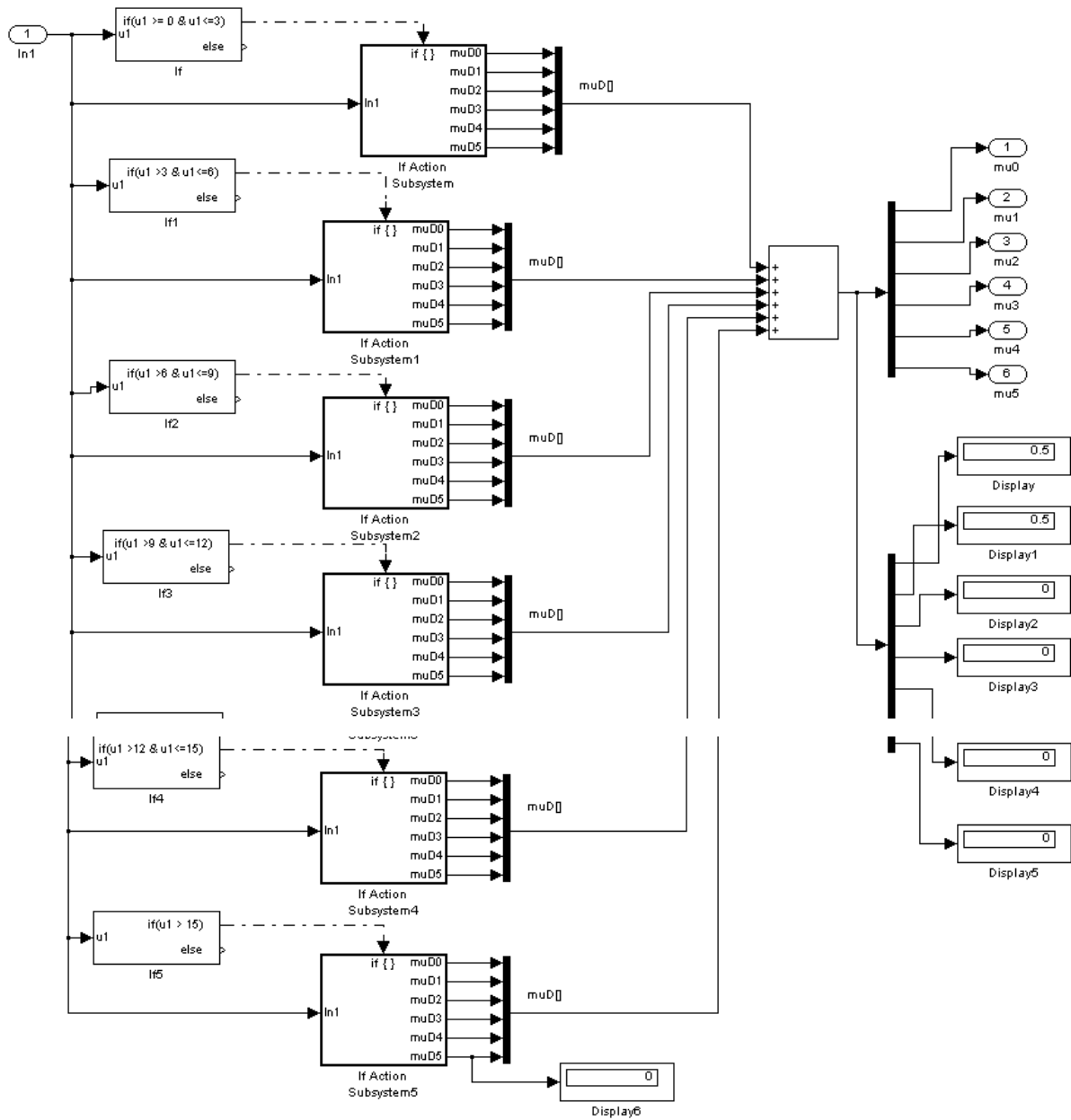
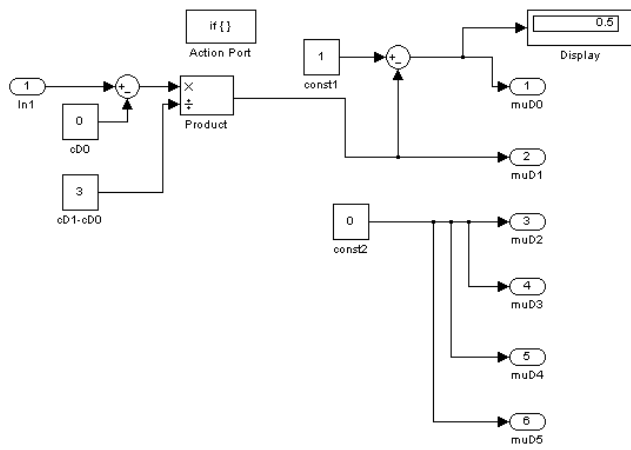
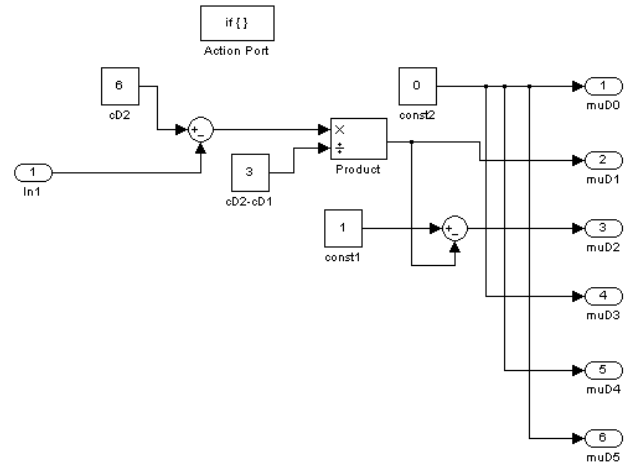


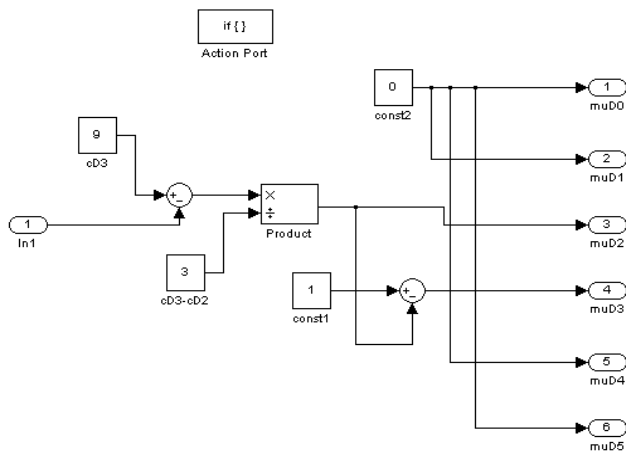
Рисунок И.8 – Фаззифікація змінної «прогнозований дефіцит вологості повітря $D(+1)$ »



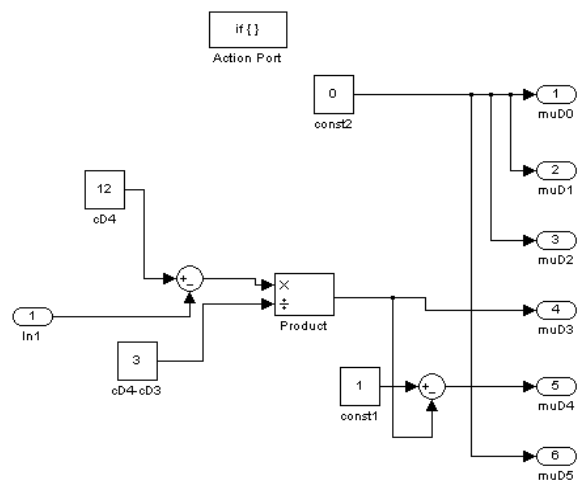
а)



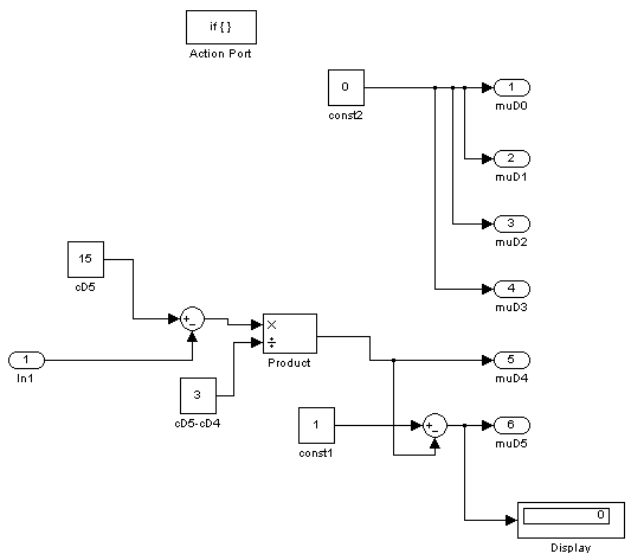
б)



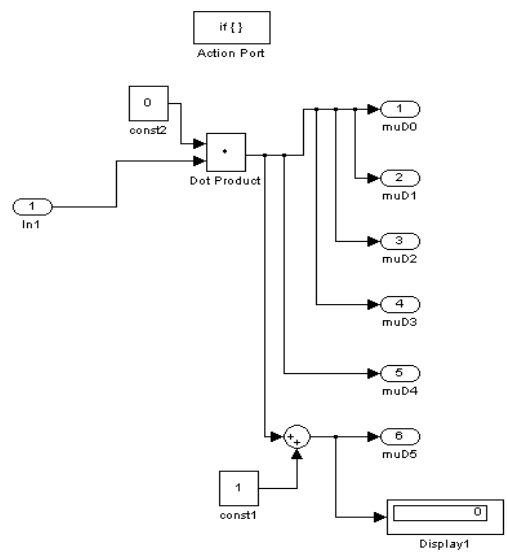
в)



г)



д)



е)

Рисунок И.9 – Фаззифікація змінної «прогнозований дефіцит вологості повітря D(+1)»: розрахунок функцій належності для різних діапазонів змінної: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6

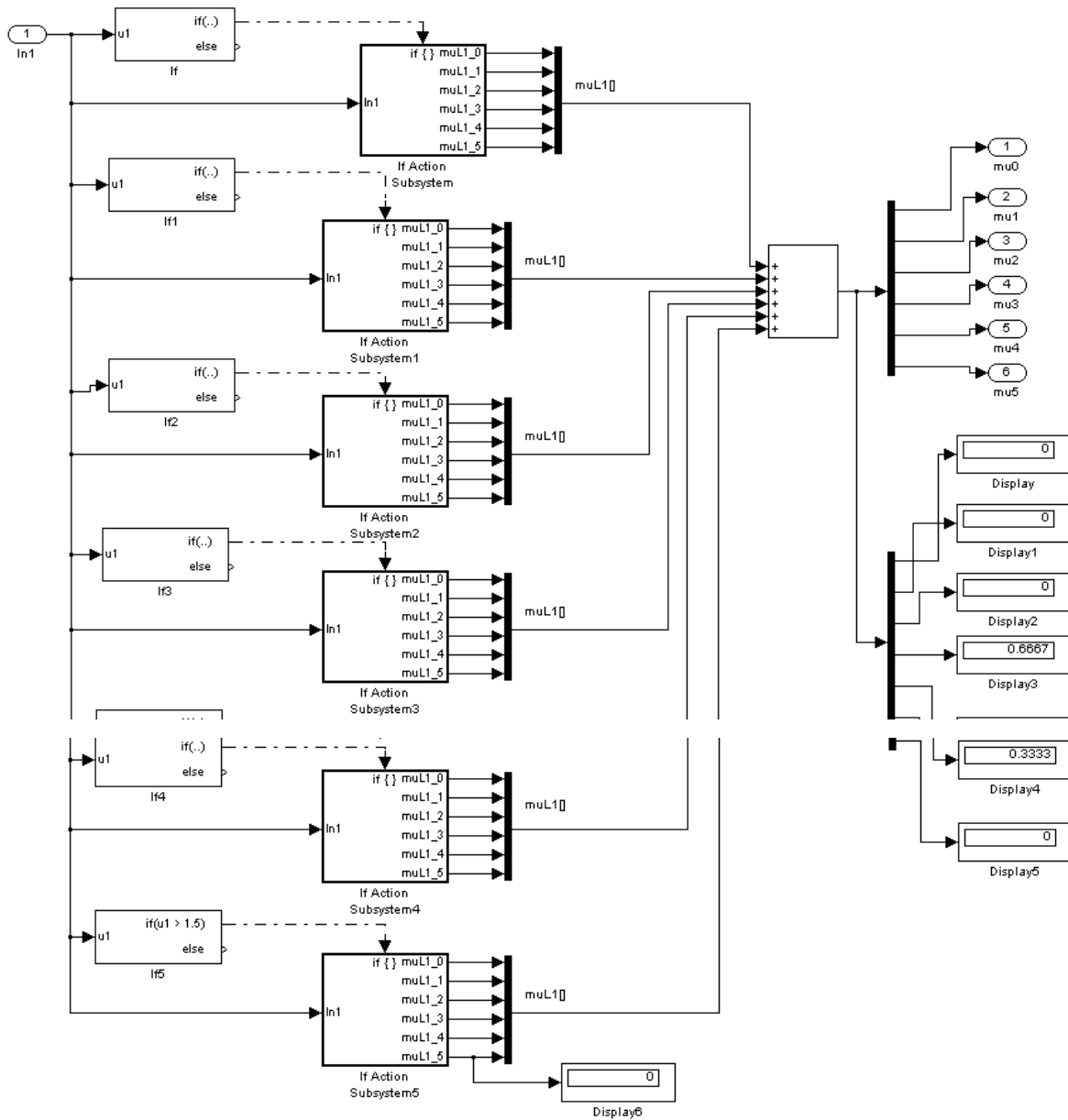
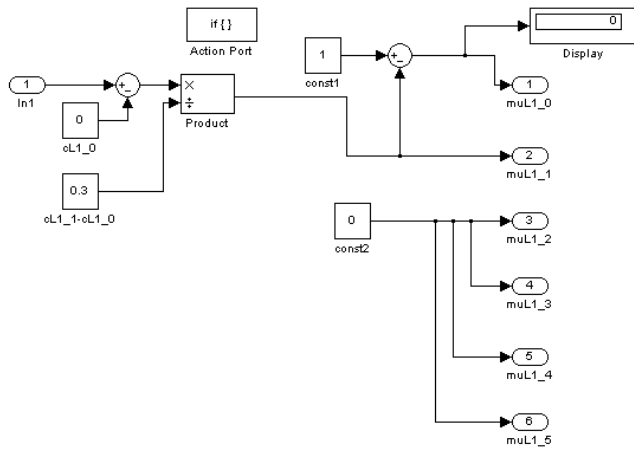
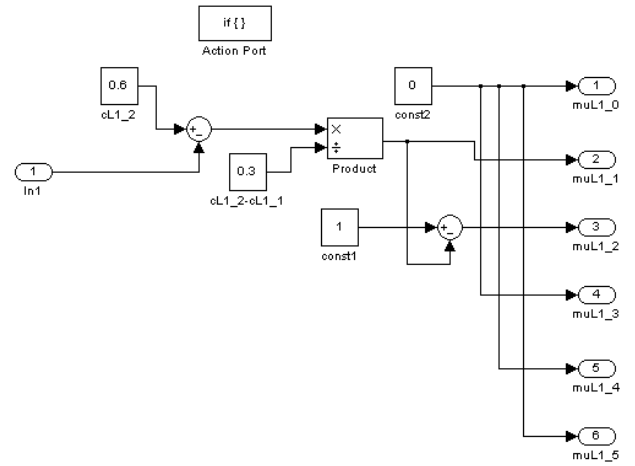


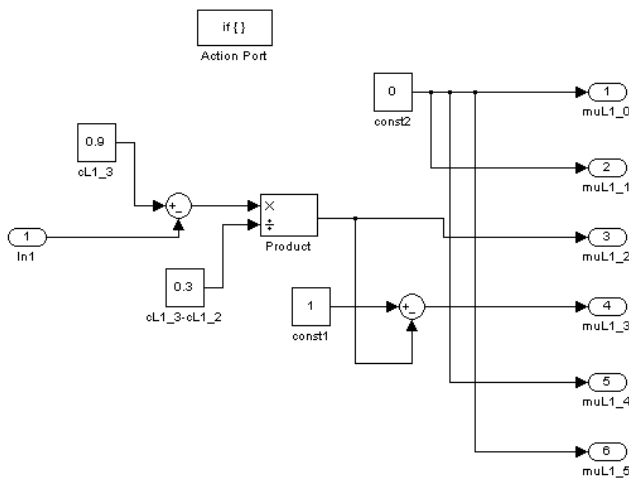
Рисунок И.10 – Фаззифікація змінної «попередній РГВ L(-)»



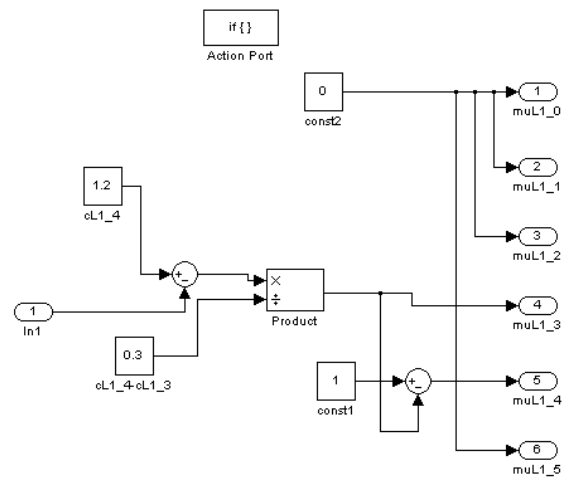
а)



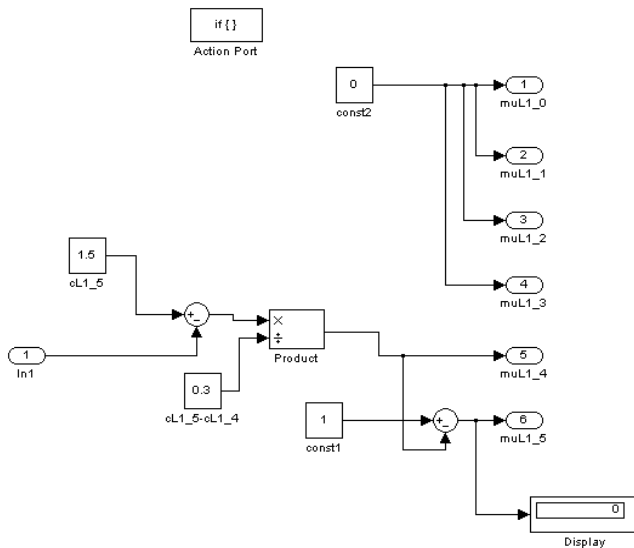
б)



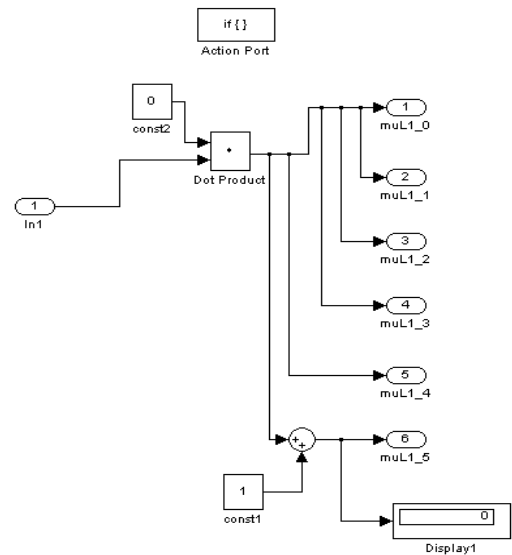
в)



г)



д)



е)

Рисунок И.11 – Фаззифікація змінних «попередній РГВ L(-1)», «поточний РГВ L»: розрахунок функцій належності для різних діапазонів змінної: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6

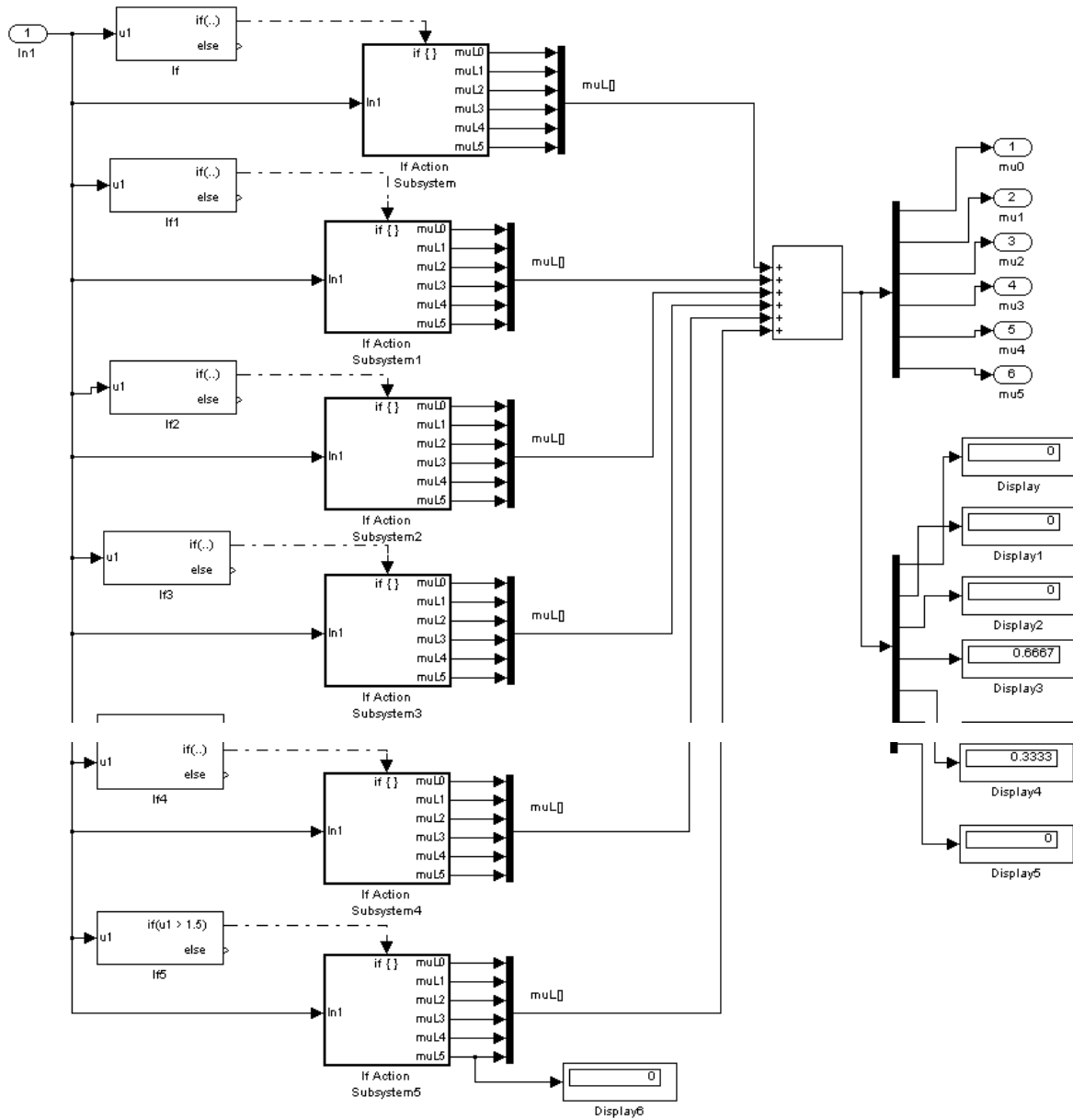


Рисунок И.12 – Фаззифікація змінної «поточний РГВ L»

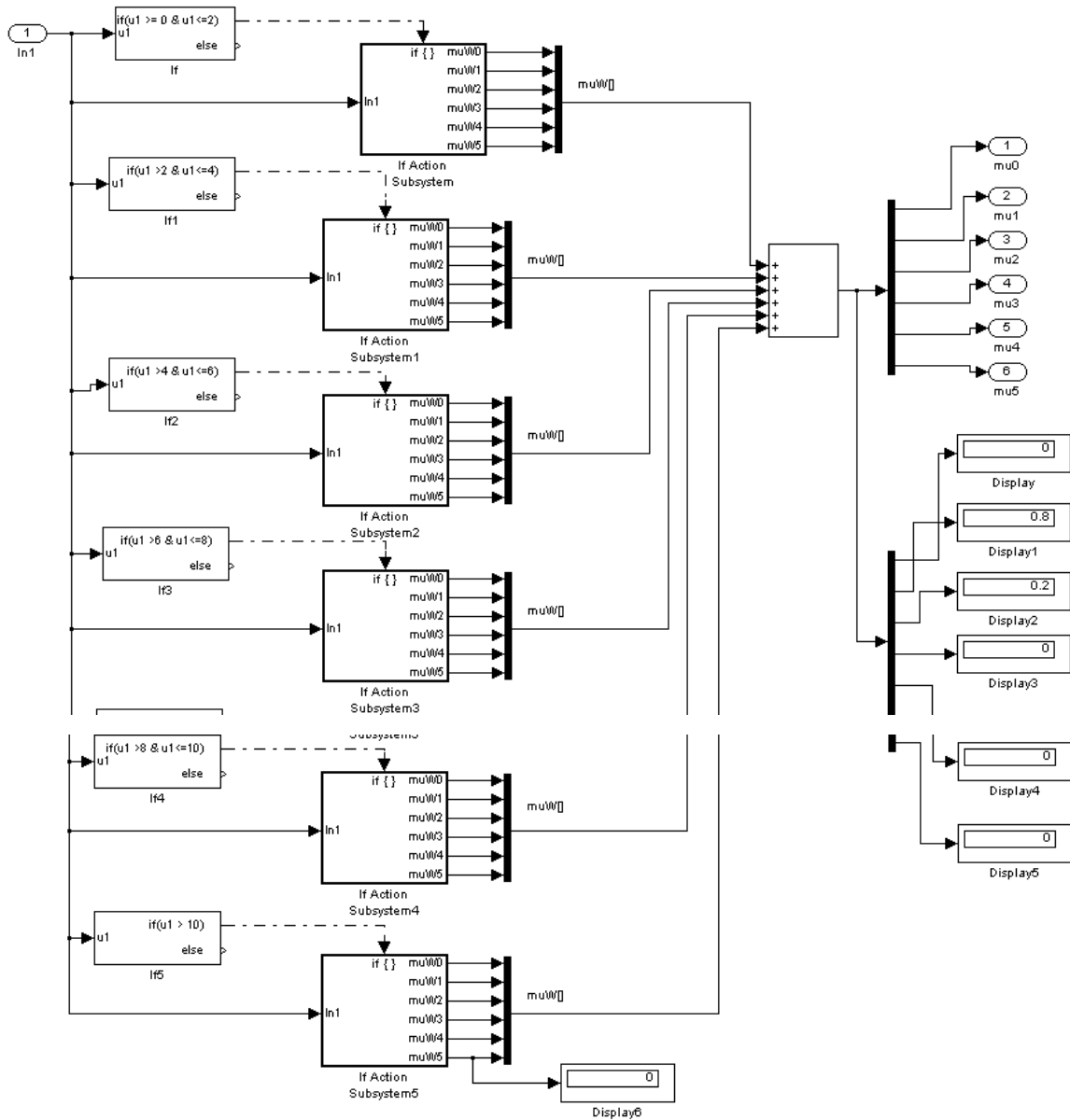
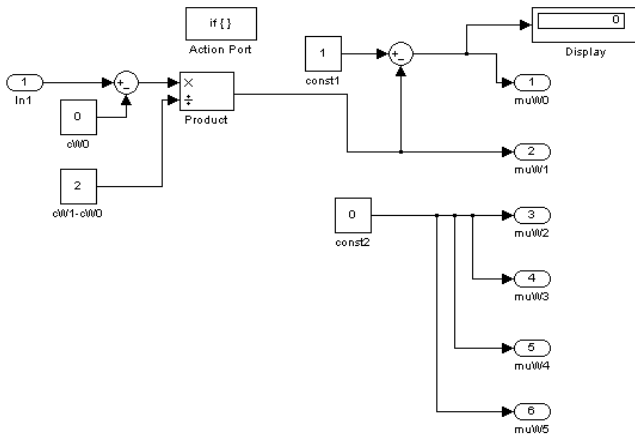
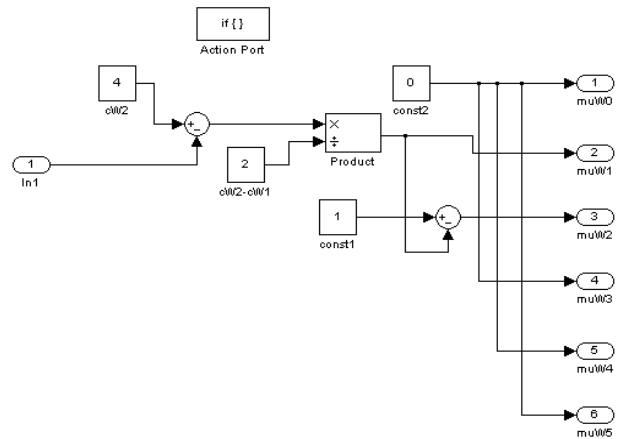


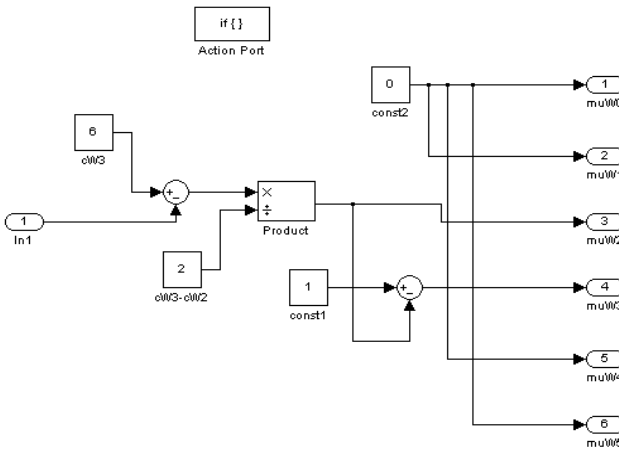
Рисунок И.13 – Фаззіфікація змінної «завдання всмоктуючого тиску $W_{task}(+1)$ у шарі ґрунту $h=0-10$ см»



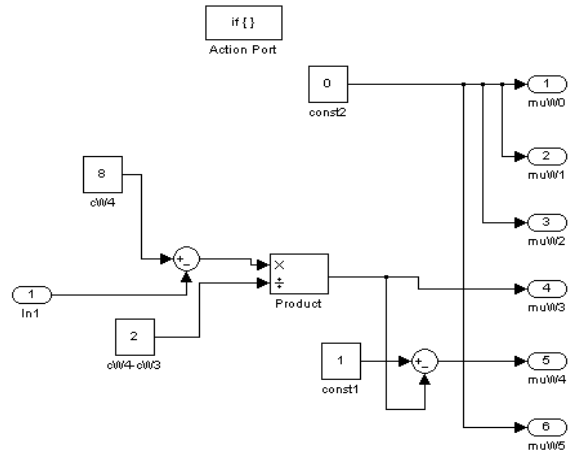
a)



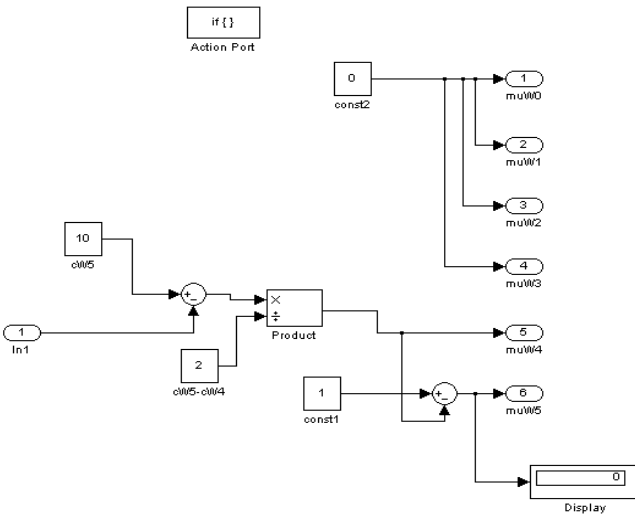
б)



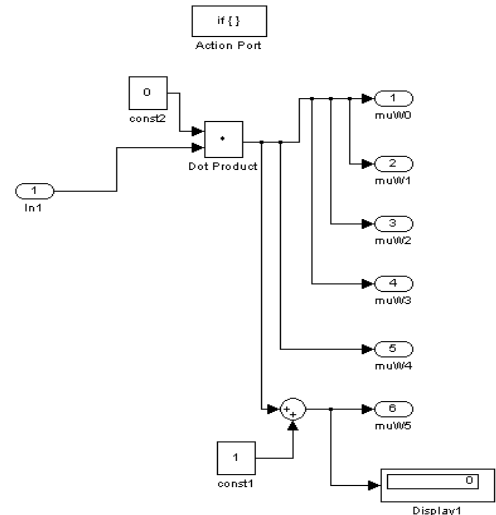
в)



г)

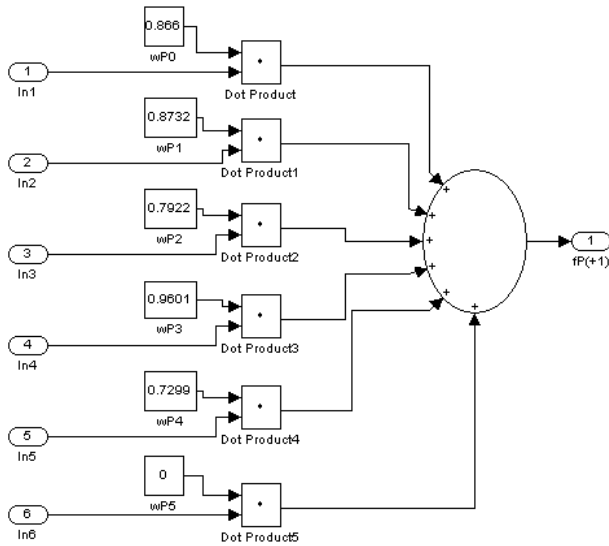


д)

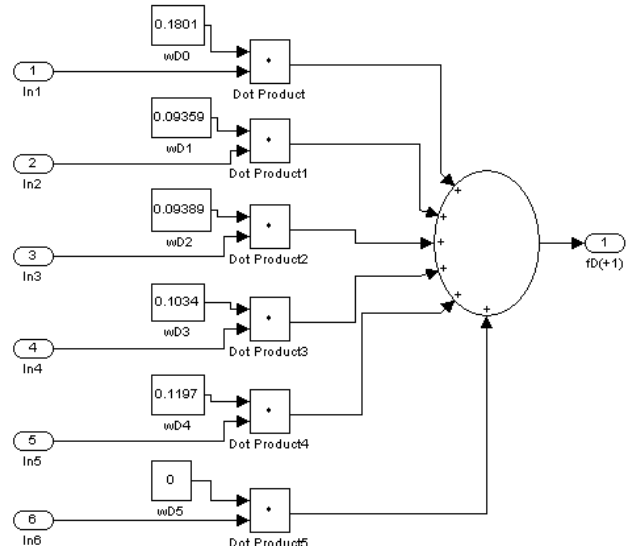


е)

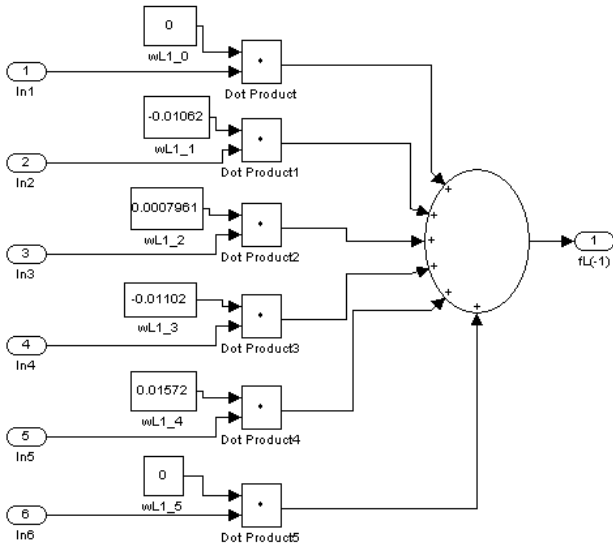
Рисунок И.14 – Фаззифікація змінних «попередній всмоктуючий тиск $W(-1)$ », «поточний всмоктуючий тиск W », «завдання всмоктуючого тиску $W_{task}(+1)$ » у шарі ґрунту $h=0-10$ см: розрахунок функцій належності для різних діапазонів змінної: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6



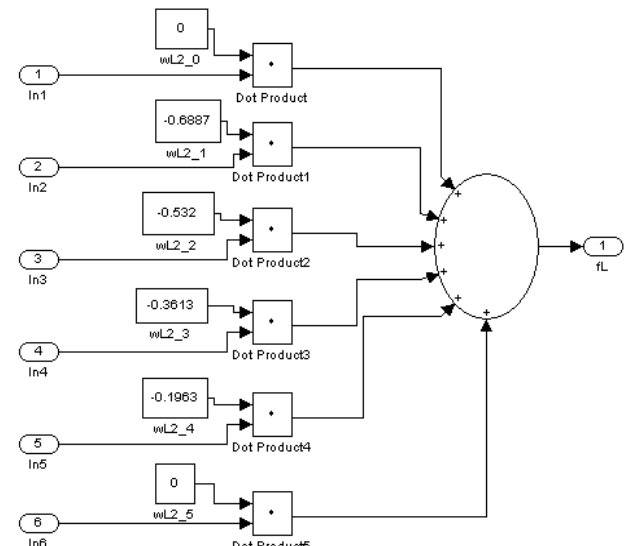
а)



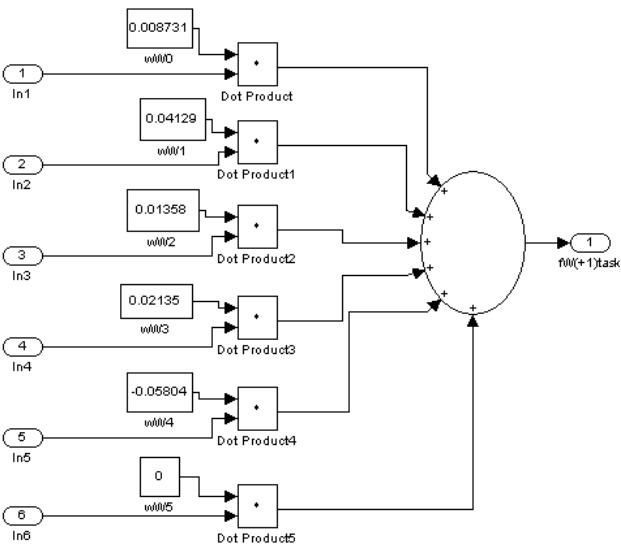
б)



в)



г)



д)

Рисунок И.15 – Розрахунок виходів нейронів нео-фаззі регулятора для вхідних змінних: а – прогнозована кількість опадів $P(+1)$, б – прогнозований дефіцит вологості повітря $D(+1)$, в – попередній РГВ $L(-1)$, поточний РГВ L , завдання всмоктуючого тиску $W_{task}(+1)$ у шарі ґрунту $h=0-10$ см

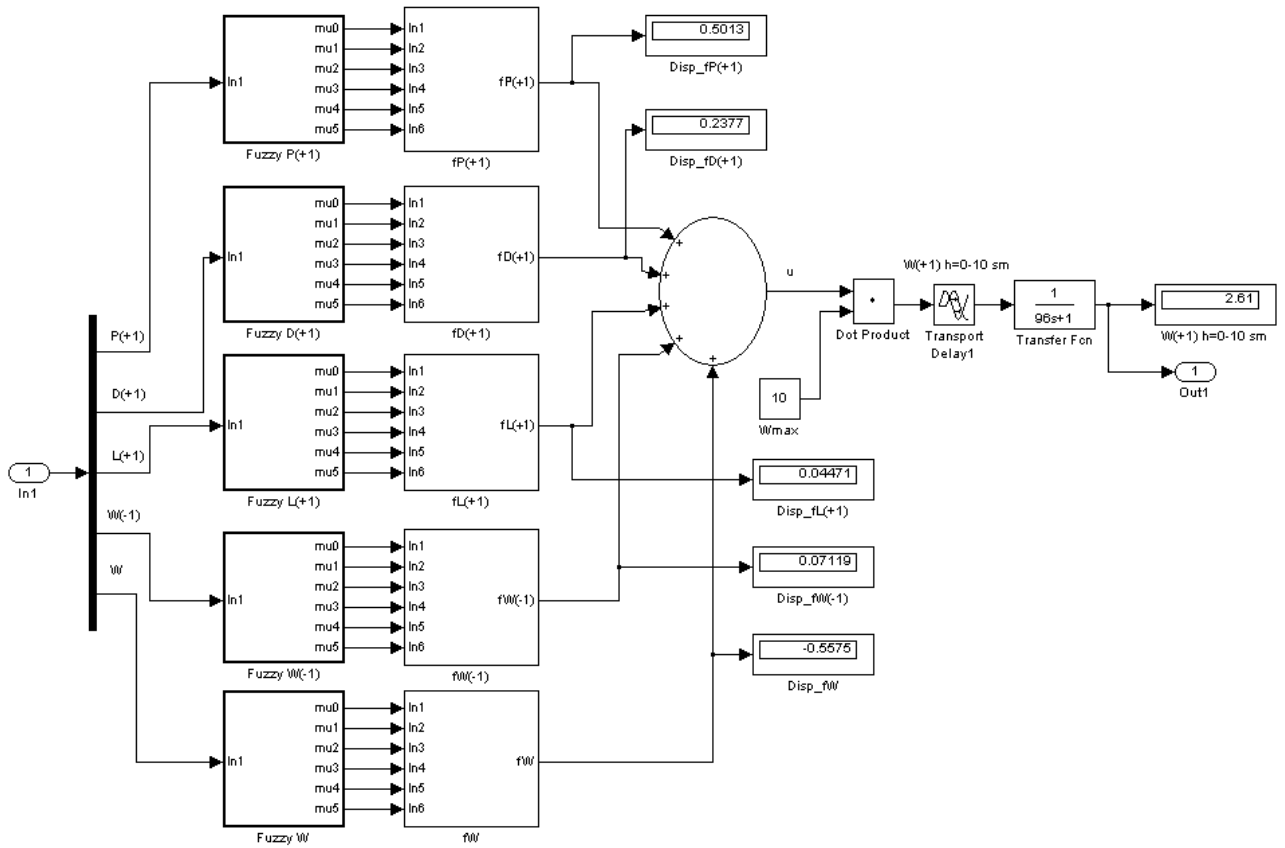


Рисунок И.16 – Нео-фаззі модель ненасиченої зони ґрунту для шару $h=0-10$ см

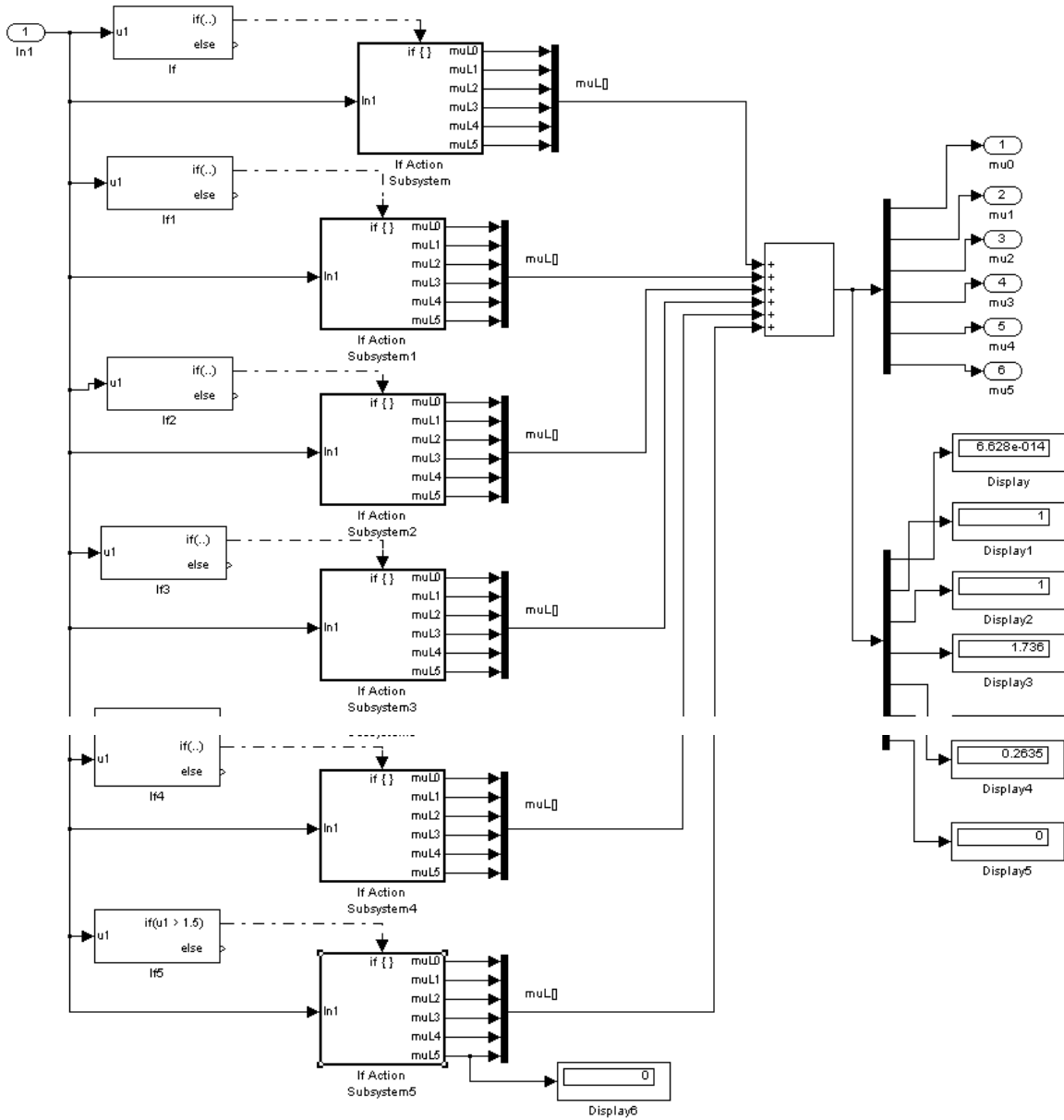
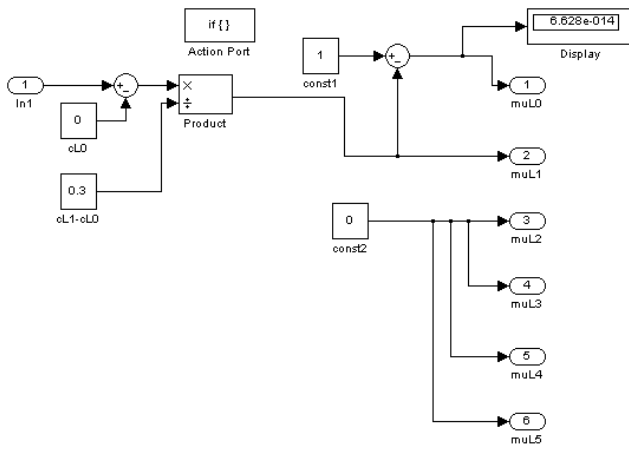
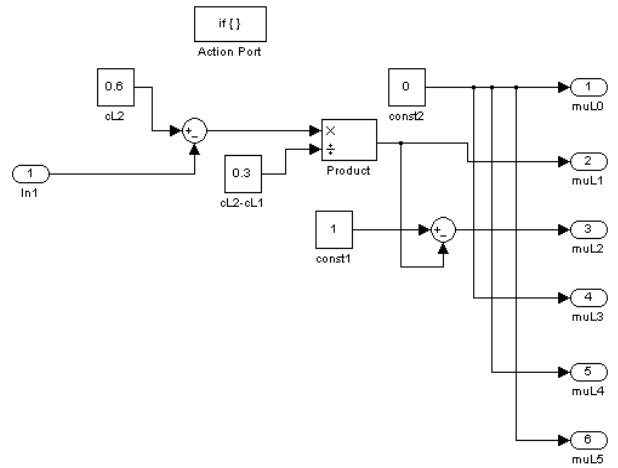


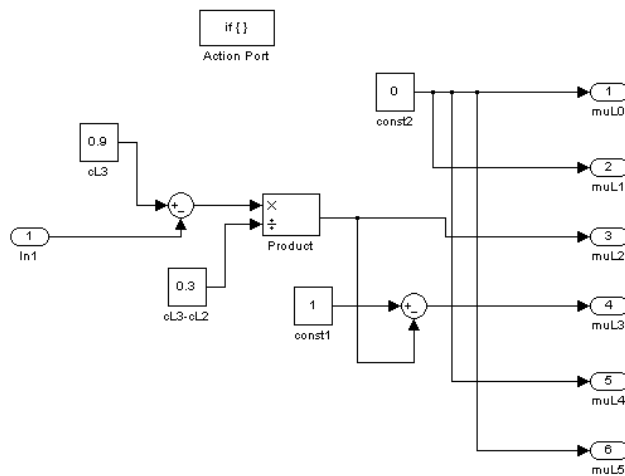
Рисунок И.17 – Фаззифікація змінної «РГВ на наступний період L(+1)»



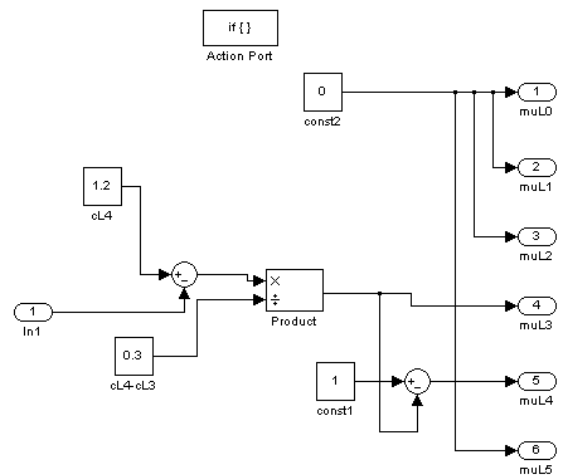
а)



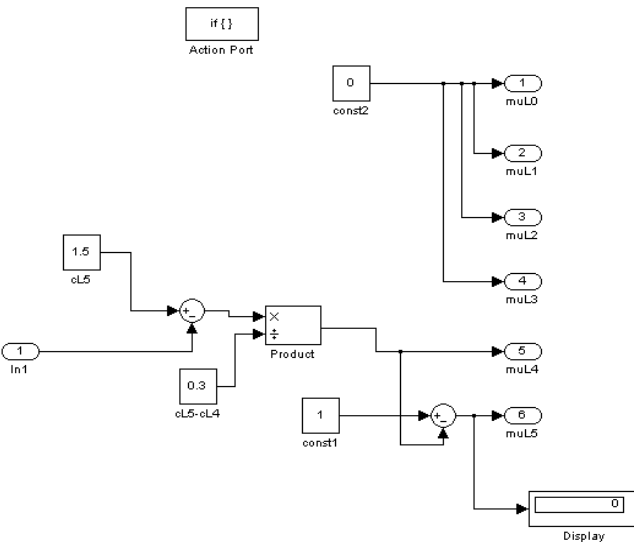
б)



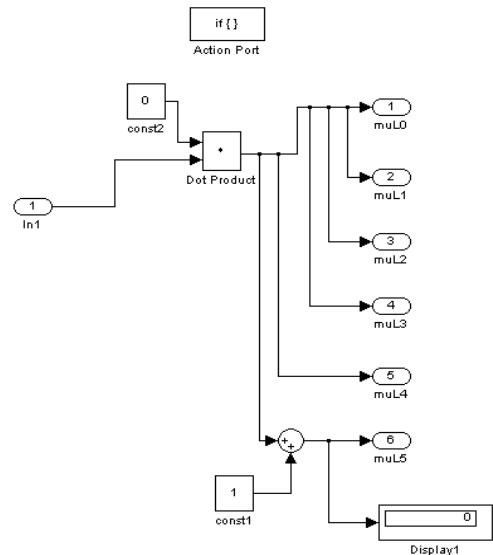
в)



г)



д)



е)

Рисунок И.18 – Фаззифікація змінної «РГВ на наступний період L(+1)»: розрахунок функцій належності для різних діапазонів змінної: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6

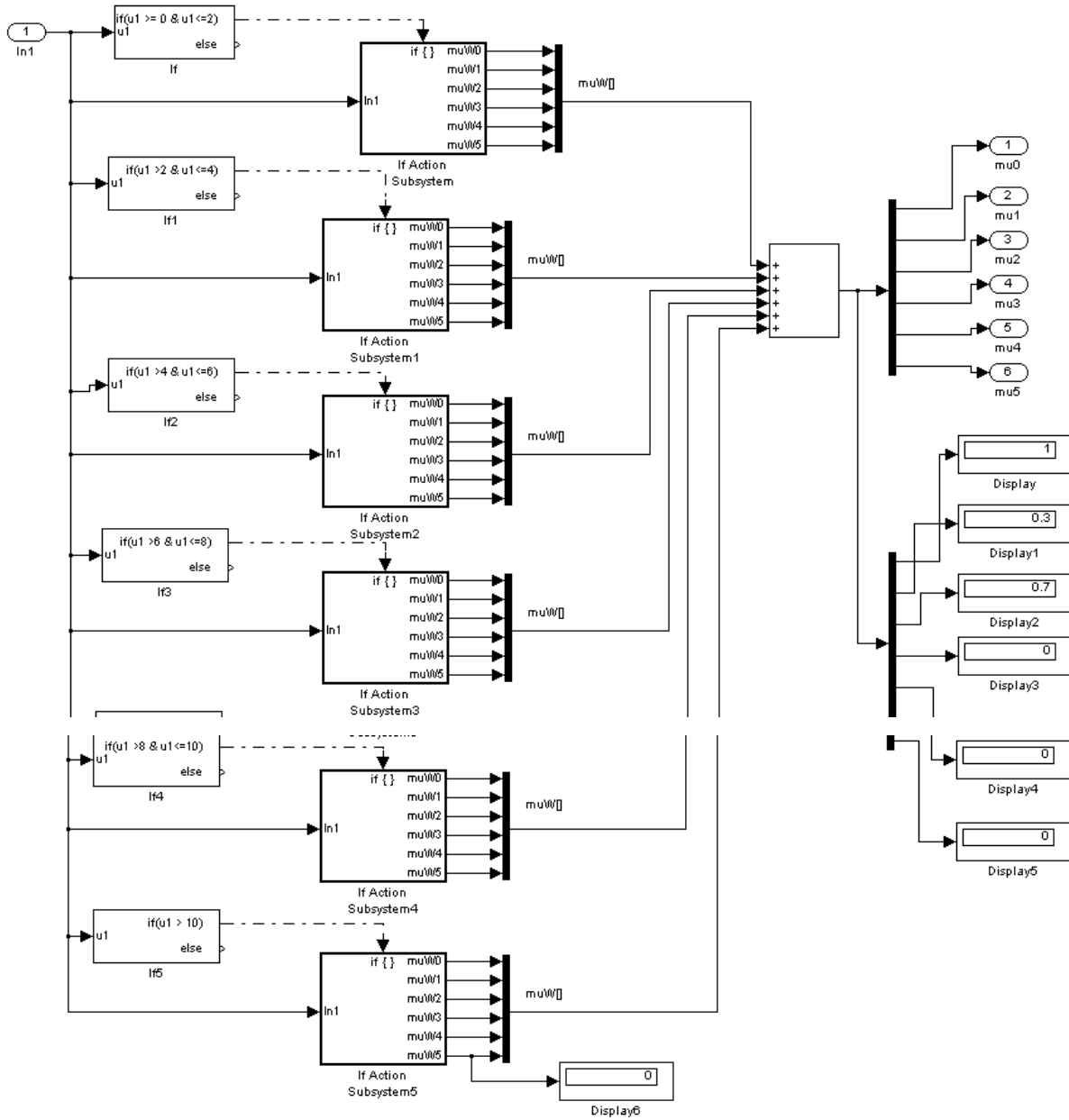


Рисунок И.19 – Фаззіфікація змінної «попередній всмоктуючий тиск $W(-1)$ » у шарі ґрунту $h=0-10$ см

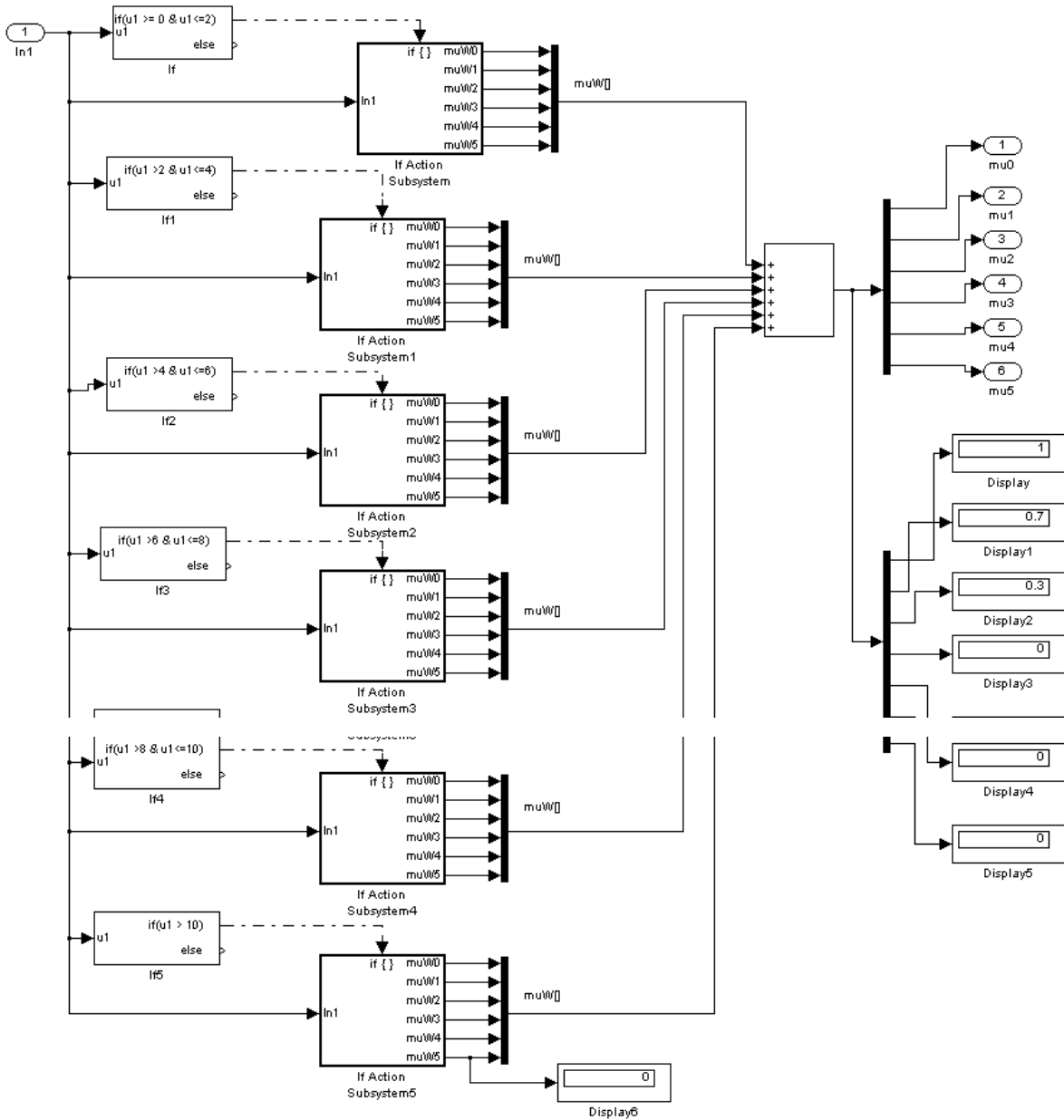
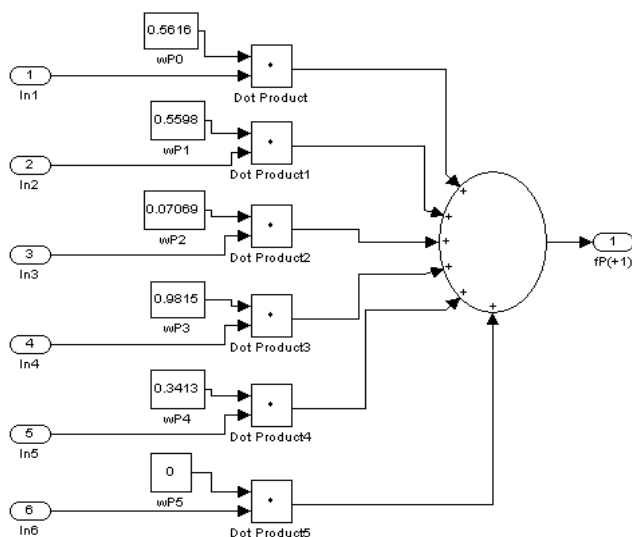
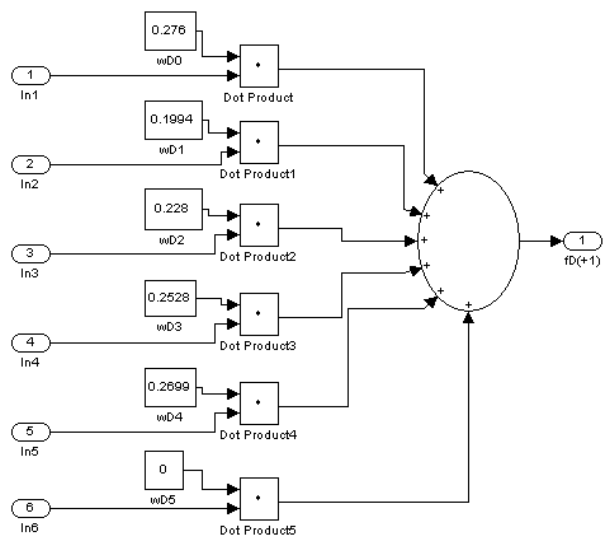


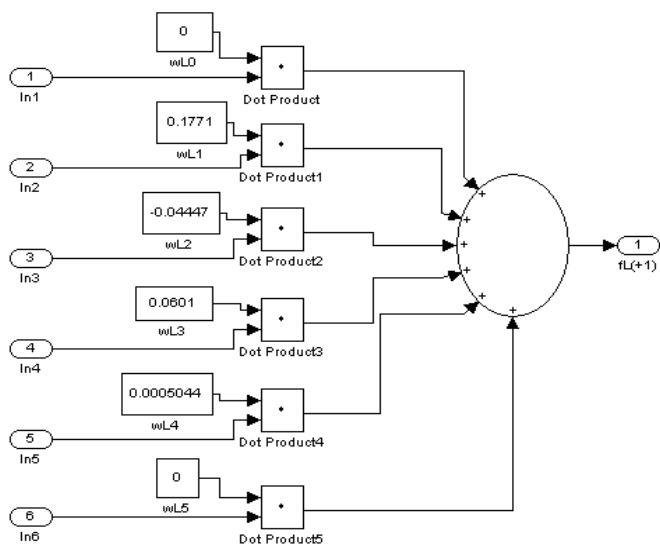
Рисунок И.20 – Фаззифікація змінної «поточний всмоктуючий тиск W » у шарі ґрунту $h=0-10$ см



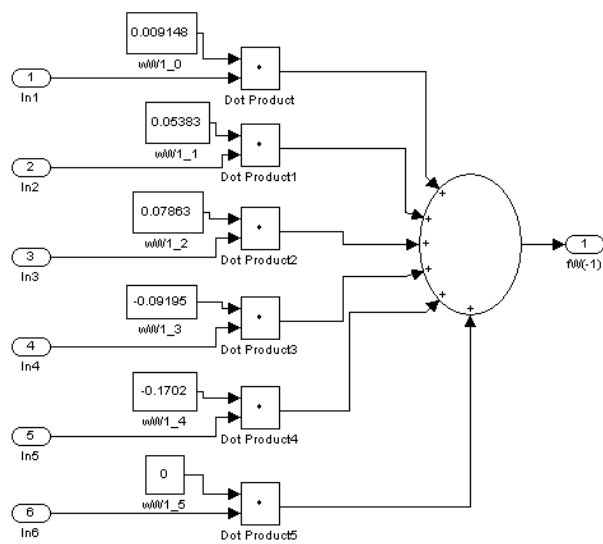
а)



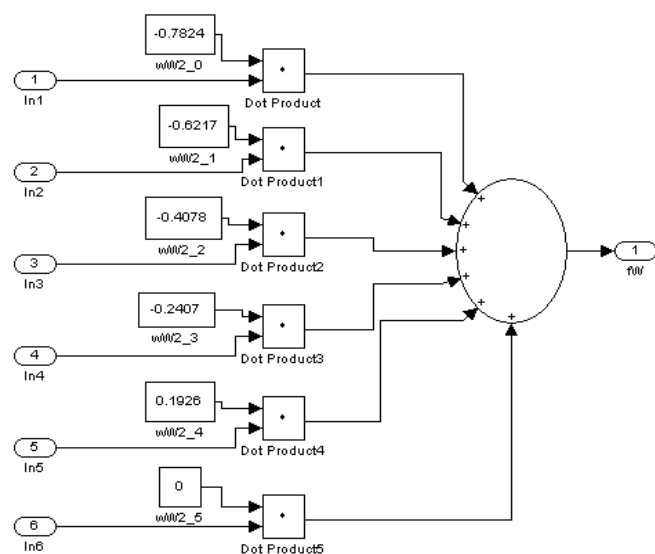
б)



в)



г)



д)

Рисунок И.21 – Розрахунок виходів нейронів нео-фаззі моделі ненасиченої зони ґрунту для шару $h=0-10$ см: а – прогнозована кількість опадів $P(+1)$, б – прогнозований дефіцит вологості повітря $D(+1)$, в – РГВ на наступний період $L(+1)$, попередній всмоктуючий тиск $W(-1)$, поточний всмоктуючий тиск W у шарі ґрунту $h=0-10$ см

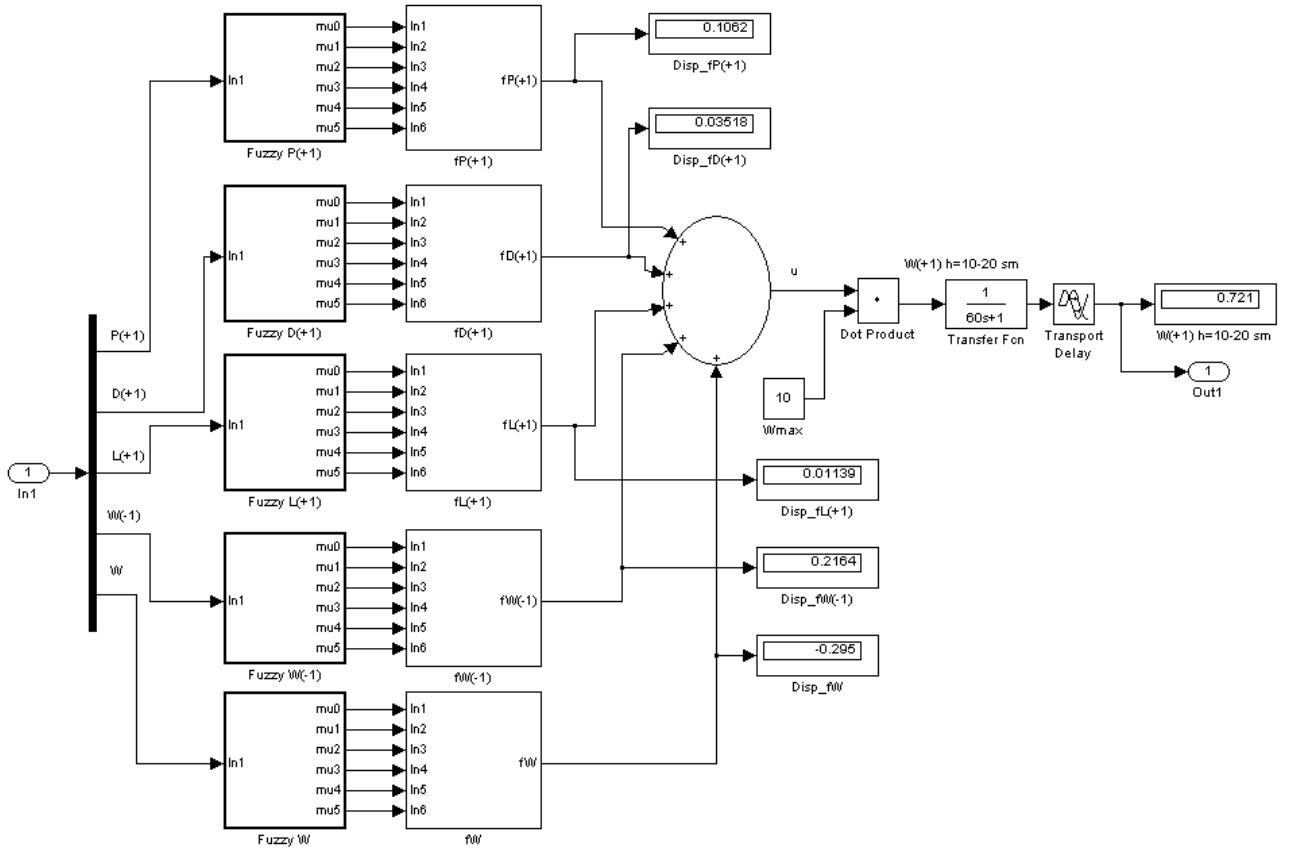


Рисунок И.22 – Нео-фаззі модель ненасиченої зони ґрунту для шару h=10-20 см

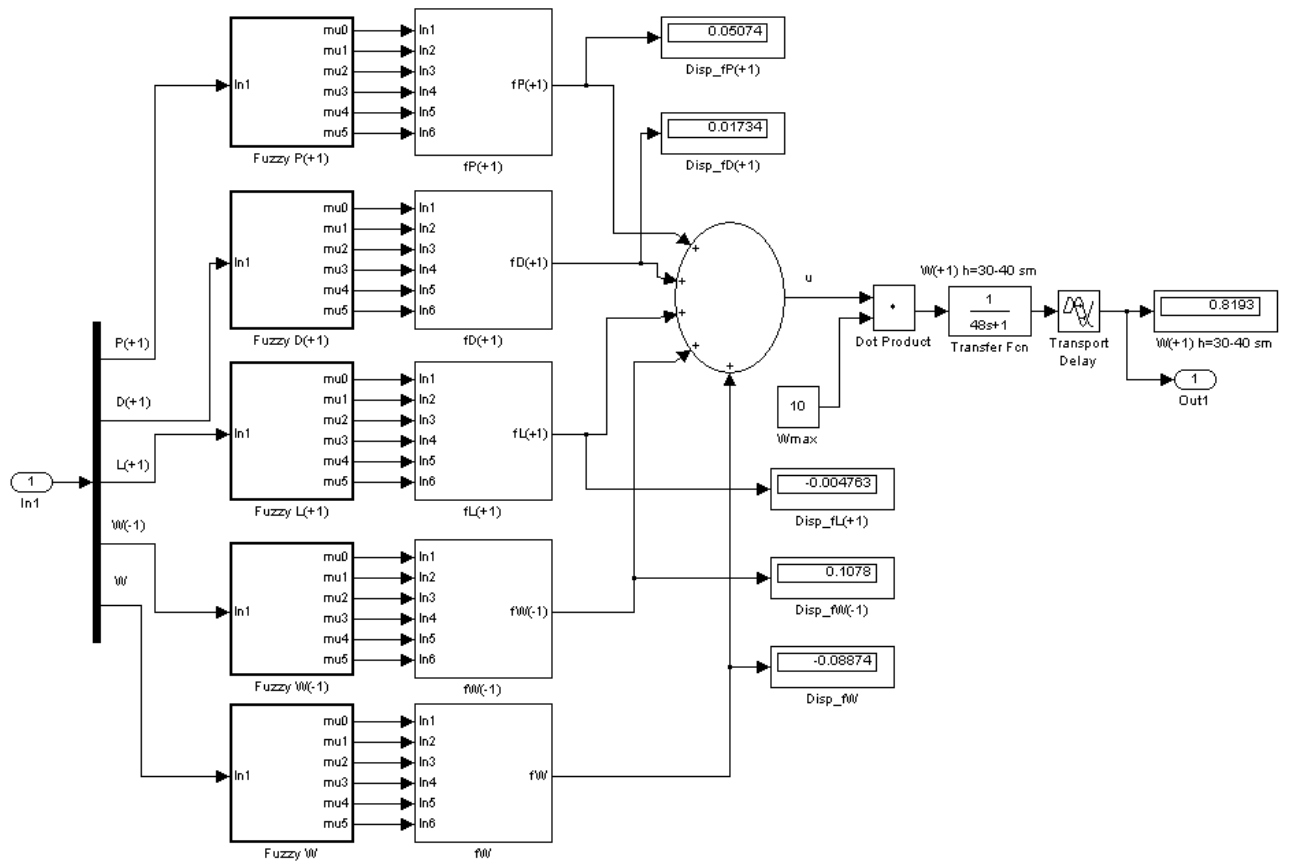
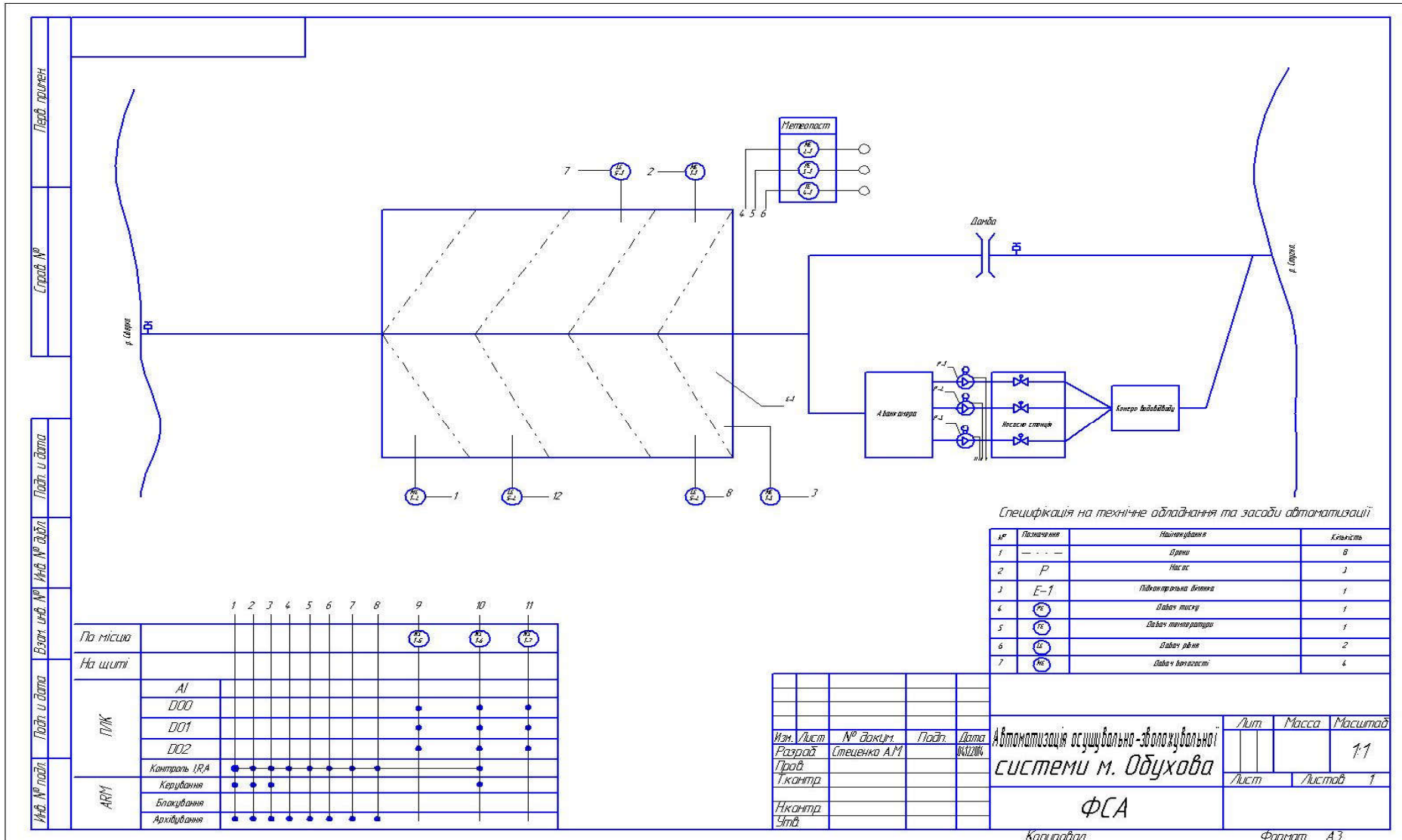


Рисунок И.23 – Нео-фаззі модель ненасиченої зони ґрунту для шару $h=30-40$ см

ДОДАТОК К

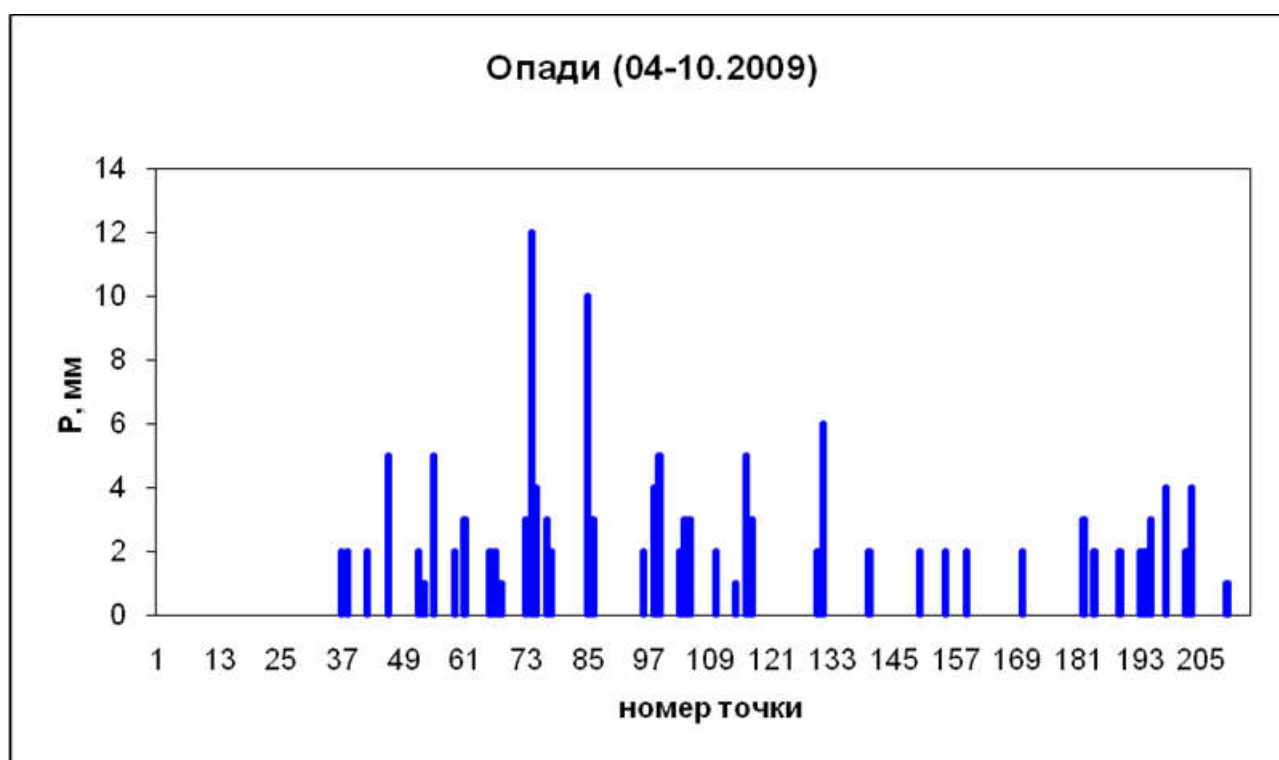
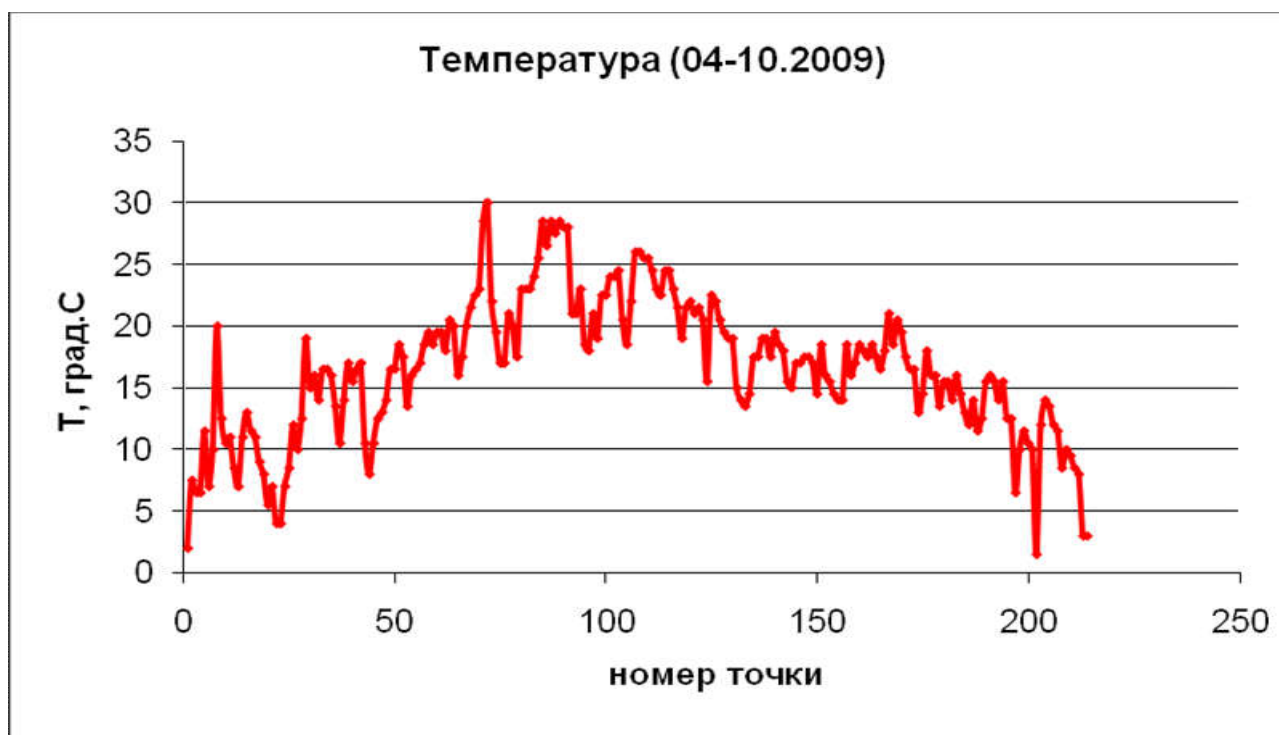
Функціональна схема автоматизації Обухівської осушувально-зволожувальної системи

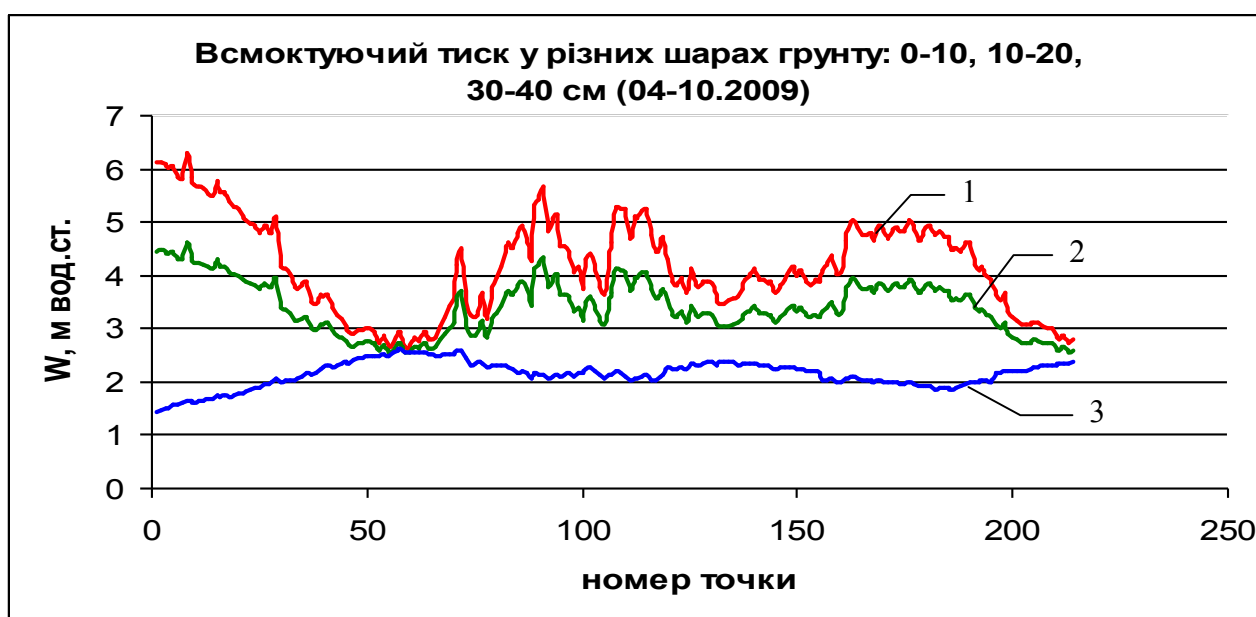
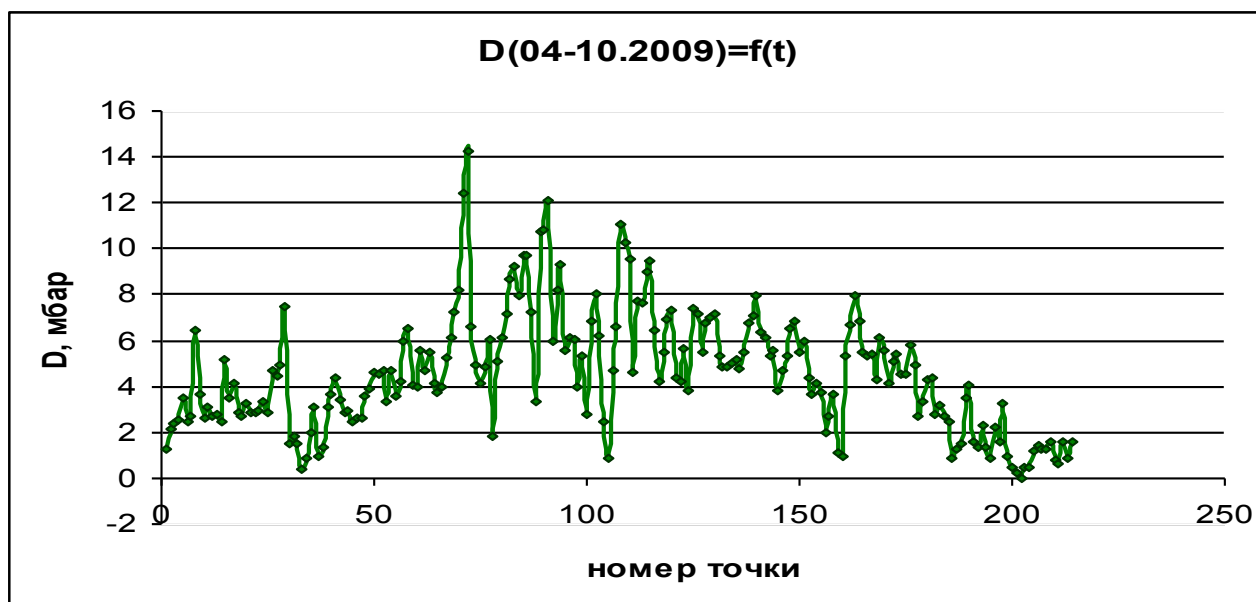
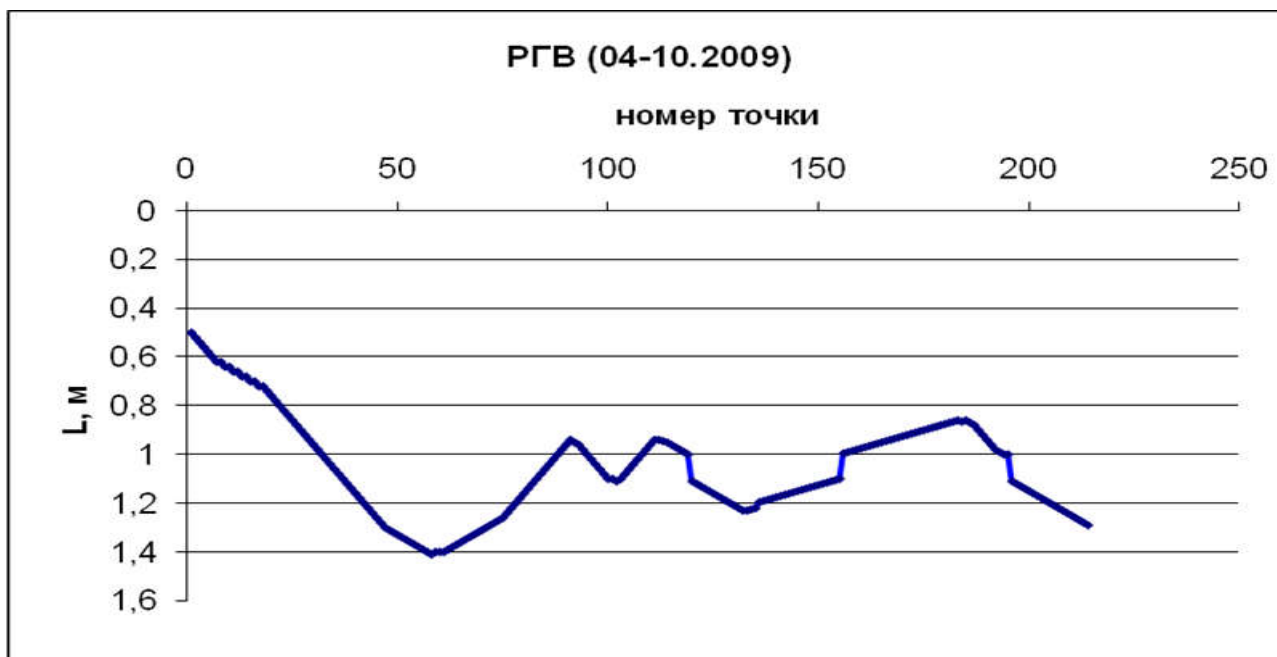


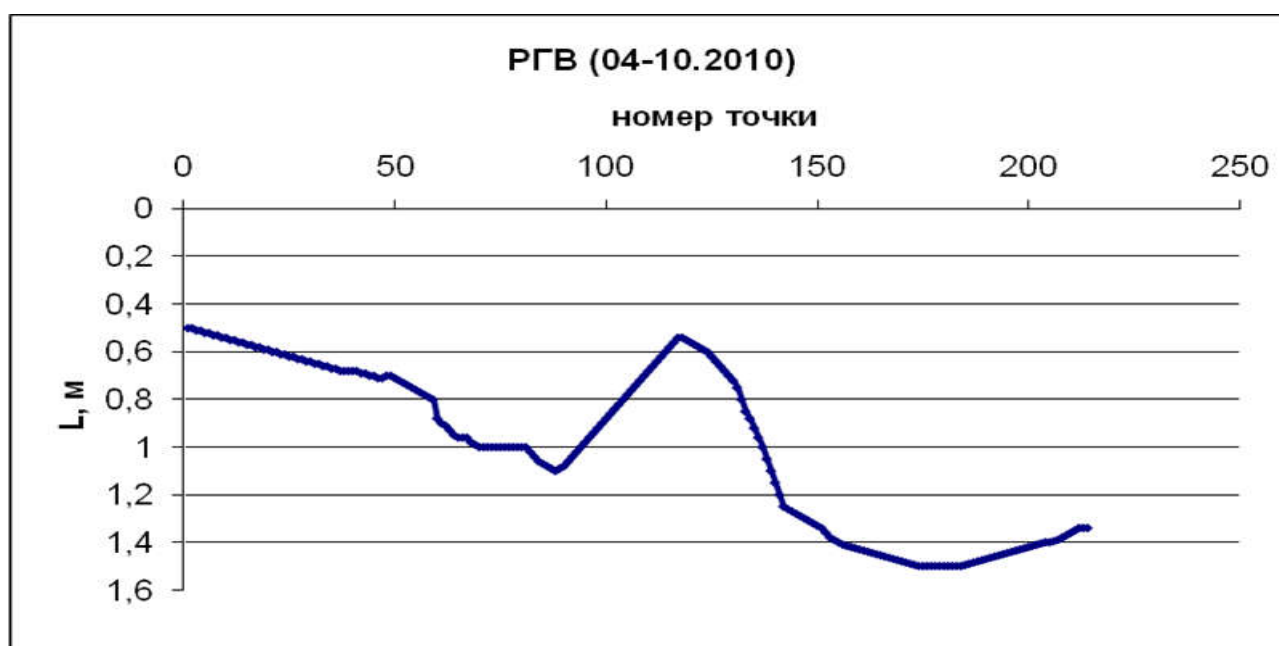
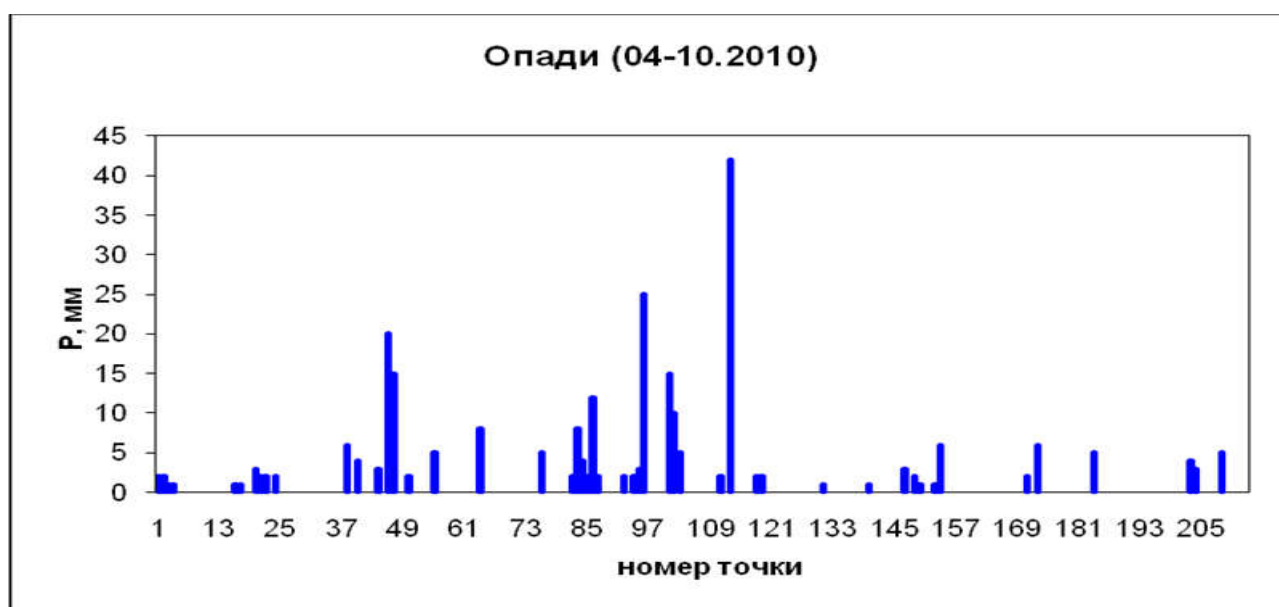
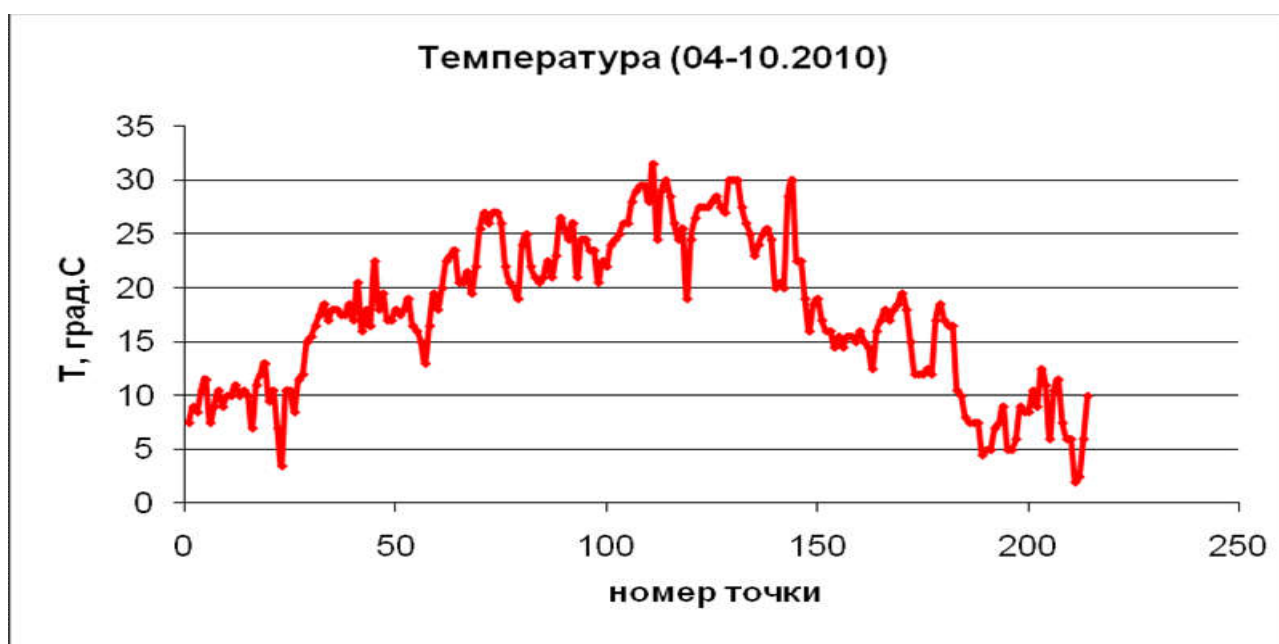
ДОДАТОК Л

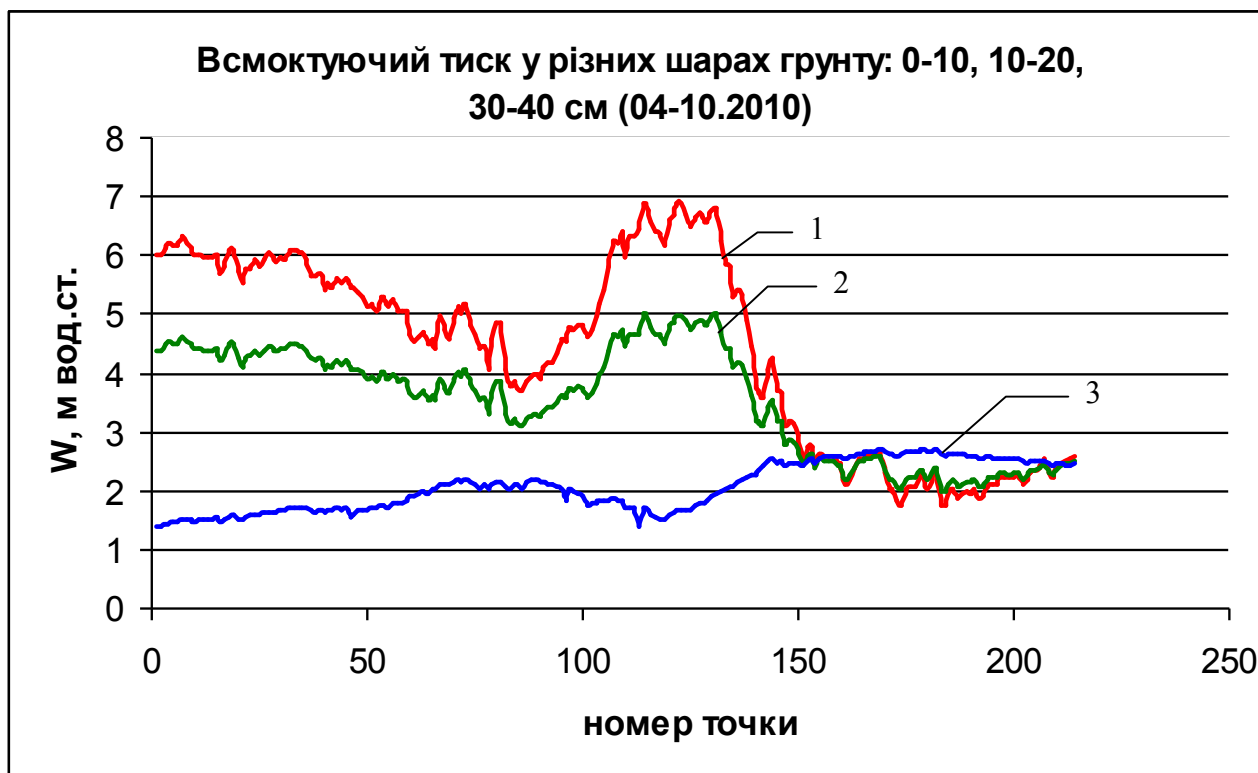
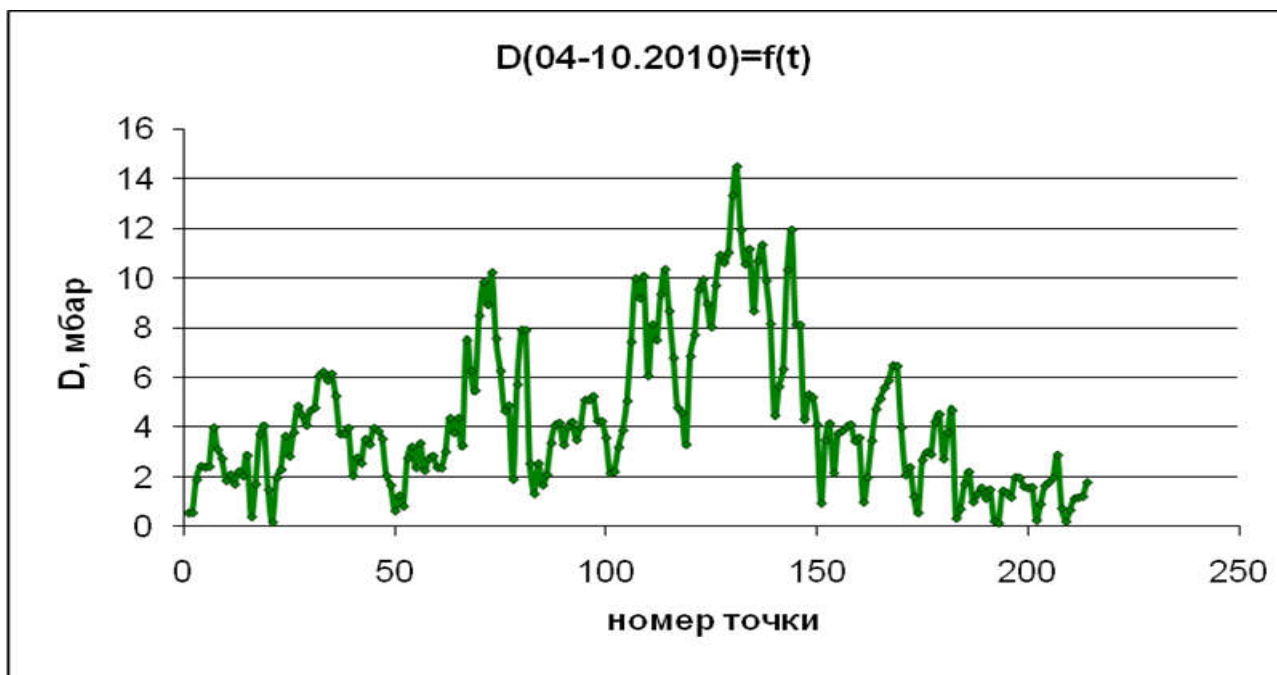
Навчальна та тестувальна вибірки даних Обухівської
сільськогосподарської станції

Навчальна вибірка даних Обухівської сільськогосподарської станції



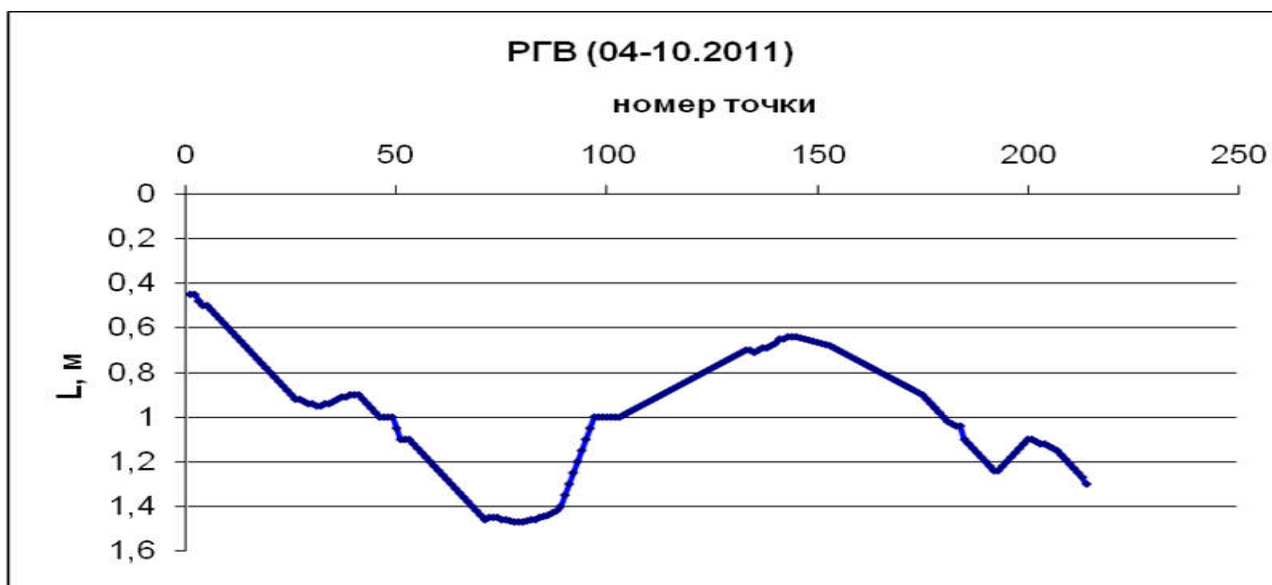
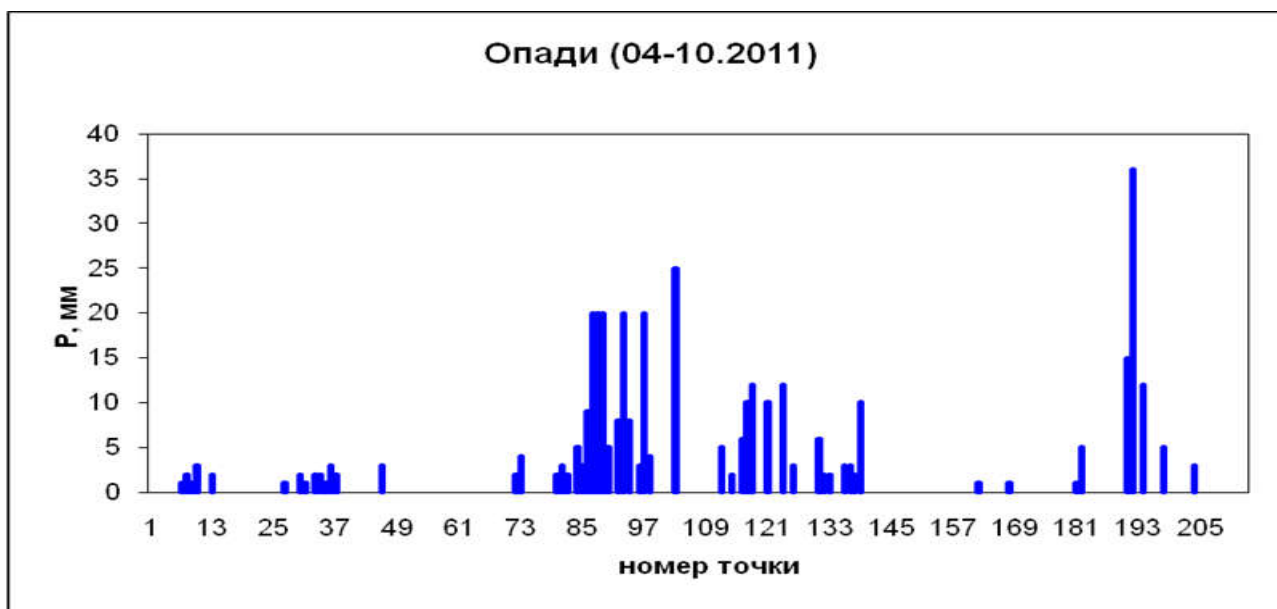
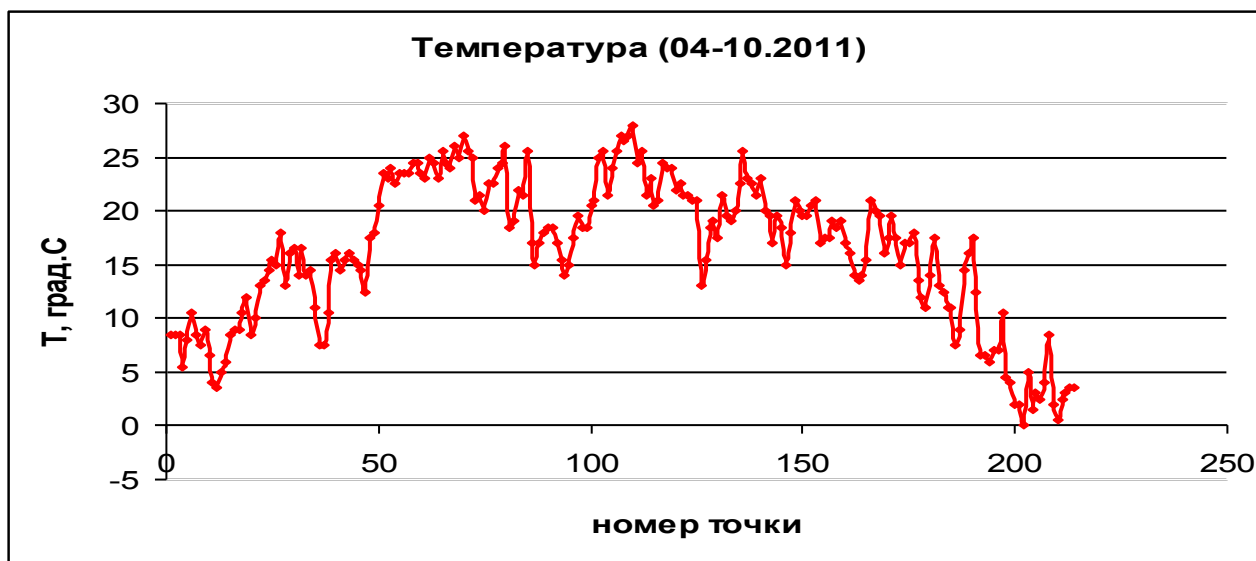


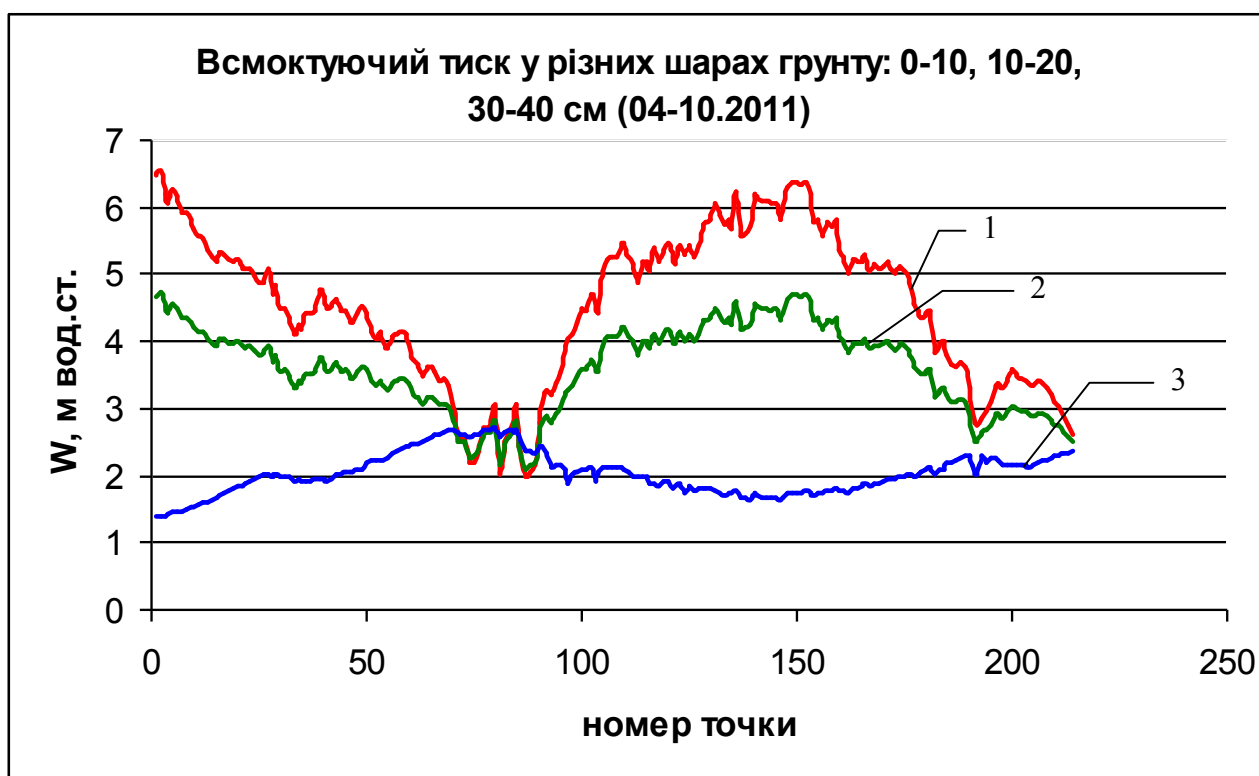
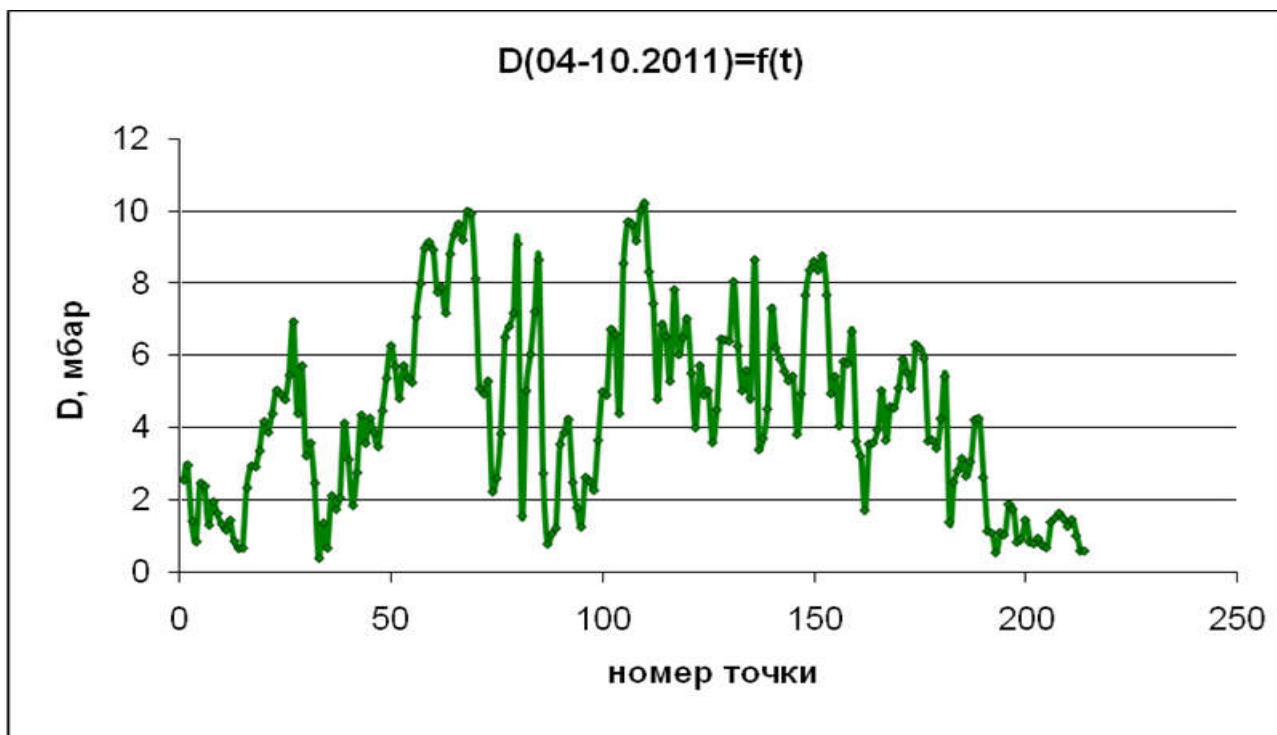




- 1 - всмоктуючий тиск у шарі ґрунту 0-10 см;
- 2 - всмоктуючий тиск у шарі ґрунту 10-20 см;
- 3 - всмоктуючий тиск у шарі ґрунту 30-40 см;

Тестувальна вибірка даних Обухівської сільськогосподарської станції





- 1 - всмоктуючий тиск у шарі ґрунту 0-10 см;
- 2 - всмоктуючий тиск у шарі ґрунту 10-20 см;
- 3 - всмоктуючий тиск у шарі ґрунту 30-40 см;

ДОДАТОК М**Документи, що підтверджують впровадження**

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Начальник Обухівського міжрайонного
управління водного господарства

м. Обухів Київської області

Жуковський Анатолій Кирилович

20 червня 2012 р.



АКТ

впровадження в Обухівському міжрайонному управлінні водного
господарства

науково-технічних розробок кандидатської дисертаційної роботи

Стеценко Анастасії Михайлівни,

старшого викладача кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих
технологій Національного університету водного господарства та
природокористування, м. Рівне

Науковий керівник: к.т.н., доцент кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного
господарства та природокористування (НУВГП) Пастушенко Володимир
Йосипович.

Комісією Обухівського міжрайонного управління водного
господарства (МУВГ) у складі:

голова комісії: начальник Обухівського міжрайонного управління водного
господарства Жуковський Анатолій Кирилович;

члени комісії:

к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
НУВГП Пастушенко Володимир Йосипович,

головний інженер Обухівського міжрайонного управління водного
господарства Васьковський Іван Миколайович,

начальник Обухівської експлуатаційної дільниці Макрицька Світлана Павлівна,
начальник Обухівського загону Київської гідрогеолого-меліоративної експедиції (КГГМЕ) Сергійко Людмила Олександрівна,
що призначена розпорядженням начальника Обухівського міжрайонного управління водного господарства № 1 від 20 червня 2012 р.,
складено цей акт про впровадження науково-технічних розробок кандидатської дисертаційної роботи Стеценко А. М.

Комісія констатує, що наступні матеріали наукових і технічних розробок дисертаційної роботи впроваджені у роботу Обухівського міжрайонного управління водного господарства:

1. Структура автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні, що передбачає оперативне врахування зовнішніх стохастичних збурень, діючих на об'єкт керування.
2. Математична модель ненасиченої зони ґрунту на базі нейронних мереж, що дозволяє прогнозувати зміну вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в залежності від попередньої та поточної його вологості, рівня ґрунтових вод (РГВ), даних короткотермінового метеопрогнозу.
3. Метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахуванням виду сільськогосподарських культур, фази їх розвитку, а також впливу стохастичних збурюючих факторів, якими є погодні умови, на основі механізмів нечіткої логіки та нейронних мереж.
4. Програмне забезпечення керуючої частини автоматизованої системи керування вологістю ґрунту на основі мікропроцесорного регулятора.
5. Програмне забезпечення автоматизованого робочого місця оператора, яке дозволяє обраховувати завдання рівня ґрунтових вод на наступний керуючий період в залежності від попереднього та поточного значення РГВ, даних короткотермінового метеопрогнозу та задаючого значення вологості ґрунту у конкретному його шарі (шар ґрунту визначається фазою розвитку рослин, що показує глибину знаходження їх кореневої системи у ґрунті); відображати значення усіх технологічних параметрів (вологість або всмоктуючий тиск ґрунту, РГВ, дані метеопараметрів) у реальному часі; змінювати режим роботи системи керування (автоматичний-ручний); вести централізовану базу даних параметрів процесу; моделювати зміну вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в залежності від попередньої та поточної вологості ґрунту, рівня

грунтових вод, даних короткотермінового метеопрогнозу; зчитувати дані метеопрогнозу; при необхідності вводити значення технологічних параметрів вручну (за відсутності якогось із датчиків).

6. Проект технічної реалізації АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, який включає в себе перелік технічних засобів автоматизації для вимірювання технологічних параметрів, здійснення керуючих впливів, обрахунку завдання, організації візуалізації ходу процесу та зв'язку з оператором.

Комісія встановила, що вищевказані матеріали наукових і технічних розробок дисертаційної роботи Стеценко А. М. забезпечують:






- можливість прогнозувати зміну вологості (всмоктуючого тиску) ґрунту в залежності від попередньої та поточної вологості ґрунту, рівня ґрунтових вод, даних короткотермінового метеопрогнозу; запропоноване автором використання нейронних мереж для моделювання дозволяє побудувати математичну модель ненасиченої зони будь-якого типу ґрунту на основі наявних експериментальних даних або даних багаторічних спостережень;
- можливість керування вологістю ґрунту, враховуючи вид вирощуваних культур, фази їх розвитку, а також вплив стохастичних збурюючих факторів, що дозволяє підвищити точність керування вологістю ґрунту, забезпечити отримання максимально можливих врожаїв сільськогосподарських культур, економити водні та енергетичні ресурси за рахунок їх раціонального використання;
- можливість обраховувати завдання рівня ґрунтових вод на наступний керуючий період з врахуванням попереднього та поточного значення РГВ, даних короткотермінового метеопрогнозу, задаючого значення вологості ґрунту у конкретному його шарі, який визначається видом сільськогосподарської культури та фазою її розвитку;

- надання відомостей оператору про значення усіх технологічних параметрів (вологість або всмоктуючий тиск ґрунту, РГВ, дані метеопараметрів) у реальному часі, можливість змінювати режим роботи з автоматичного на ручний дистанційний і навпаки, при необхідності вводити значення технологічних параметрів вручну;
- ведення бази даних технологічних параметрів з метою її подальшого використання для перенавчання нейронних мереж, які використовуються для прогнозування вологості у ненасиченій зоні ґрунту та керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур, з метою підвищення точності їх роботи.

Комісія відзначає, що наукові і технічні розробки Стеценко А. М. є значним науковим внеском у проектування автоматизованих систем керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах та представляють практичний інтерес для впровадження.

Голова комісії:

Члени комісії:

 / Жуковський А. К. /
 / Пастушенко В. Й. /
 / Васьковський І. М. /
 / Макрицька С. П. /
 / Сергійко Л. О. /



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, тел. (0362)63-30-98, факс (0362) 63-32-09, mail@nuwm.edu.ua

Від 01.10.2015 № 97

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання у навчальному процесі
 Національного університету водного господарства та природокористування результатів
 досліджень і розробок, одержаних при виконанні дисертаційної роботи
 Стеценко Анастасії Михайлівни на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Використані у навчальному процесі науково-методичні розробки та результати досліджень старшого викладача кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Стеценко А.М., що викладені в її дисертаційній роботі, забезпечують набуття студентами теоретичних знань та сприяють отриманню практичних навиків в автоматизованому керуванні технологічними процесами та математичному моделюванні об'єктів керування на основі штучних нейронних мереж і нечіткої логіки в умовах дії збурень. Дані розробки використовуються при викладанні дисциплін за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та спеціальністю 7.05020201, 8.05020201 «Автоматизоване управління технологічними процесами»:

«Інтегровані системи управління»: Тема 10. Інтелектуальні системи керування.

«Проектування комп'ютерно-інтегрованих систем управління»: Тема 8. Розробка багаторівневих автоматизованих систем керування технологічними процесами та об'єктами з розподіленими параметрами з використанням інтелектуальних алгоритмів.

Проректор з наукової роботи
 та міжнародних зв'язків,
 д.е.н., професор



Н.Б. Савіна