

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

СТЕЦЕНКО АНАСТАСІЯ МИХАЙЛІВНА

УДК 004.896

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ ПІДГРУНТОВОМУ ЗВОЛОЖЕННІ
З ВРАХУВАННЯМ ЗБУРЕНЬ

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Пастушенко Володимир Йосипович,

професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Леві Леонід Ісаакович,
завідувач кафедри прикладної математики, інформатики і математичного моделювання Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, м. Полтава

доктор технічних наук, професор
Руденко Олег Григорійович,
завідувач кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків

Захист відбудеться «31» травня 2017 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «21» квітня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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. Зокрема, в Україні такі території охоплюють майже дві третини території. 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. Підґрунтове зволоження широко застосовують на територіях з глибиною залягання ґрунтових вод до 1.5-2 м та рівнинним рельєфом. Прикладами є західна та центральна частини України, Білорусь. 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.

На цей час існує ряд методів керування вологістю ґрунту на основі багатопарової моделі вологопереносу та поєднання короткотермінового та довготермінового метеорологічних прогнозів. Однак відкритими залишаються питання адаптації і навчання 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. 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 НДР «Розробка та дослідження елементів і систем автоматизації та їх моделювання», № ДР 0110U000-823, що виконувалася у Національному університеті водного господарства та природокористування 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), в якій автор брала участь як співвиконавець.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка моделей і методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-

зволожувальних системах з підґрунтовим зволоженням для підвищення ефективності їх функціонування і економії водних та енергетичних ресурсів.

Задачами дослідження є:

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 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 отриманих результатів. Основні результати, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

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 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 швидкість роботи та опрацювання інформації, точність керування вологістю кореневого шару ґрунту.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати досліджень можуть бути використані у 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.), у НДР студентів, підготовці дипломних проектів та магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [1] – 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; [2] – метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ґрунту за допомогою нейронних мереж; [3] – методи керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі багат шарових нейронних мереж прямого поширення та нео-фаззі мереж з 5-ма входами; [4] – метод керування вологістю ґрунту та технічна реалізація АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі методів нечіткої логіки; [5] – структурна схема, метод керування та технічна реалізація АСК вологозабезпеченістю при крапельному зволоженні; [6] – 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; [7] – інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю; [8] – математична модель прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах ненасиченої зони ґрунту за допомогою нео-фаззі мереж з 5-ма входами; [9] – математична модель вертикального вологопереносу в ґрунті на базі методу Ньютона-Рафсона та нейронних мереж різної архітектури; [10] – удосконалена конструкція гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії на базі мікропроцесорного модуля; [11; 12] – багат шарові нейронні моделі з різною кількістю вхідних параметрів (3; 4; 7;

11) для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту; [13] – математичні моделі для прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту на основі адаптивних нейро-фаззі мереж з 7-ма входами; [14] – система прогнозування вологозабезпечення при підґрунтовому зволоженні з врахуванням збурень на базі нейронних мереж різної топології; [15; 17] – 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; [16] – метод керування вологозабезпеченістю при крапельному зволоженні в умовах дії випадкових погодних впливів на основі нечіткої логіки; [18; 20] – інформаційна та технічна структура АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому та крапельному зволоженні; [19] – корекція рівня ґрунтових вод (РГВ), обчисленого нейрорегулятором, за допомогою методів прийняття рішень в умовах багатокритеріальності; [21] – метод ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейронних мереж; [22; 23; 24] – програмно-апаратне забезпечення АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на меліоративних системах двосторонньої дії з врахуванням збурень; [25; 26] – метод керування вологозабезпеченістю при підґрунтовому зволоженні з використанням багат шарових нейронних мереж з 11-ма входами, математичної моделі ненасиченої зони ґрунту на основі диференційного рівняння вологопереносу; [27; 28] – математична модель ненасиченої зони ґрунту та метод керування вологістю на основі нео-фаззі мереж з 5-ма входами; [29] – дослідження різних архітектур багат шарових нейронних мереж прямого поширення для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та керування вологістю в АСК з підґрунтовим зволоженням; [30] – методи моделювання вертикального вологопереносу в системах автоматизації вологозабезпечення; [30; 31] – математична модель для прогнозування та керування всмоктуючим тиском ґрунту на базі багат шарових нейронних мереж з 5-ма входами; [32] – моделювання динаміки вологозапасів для трьох шарів ґрунту на основі методу Ньютона-Рафсона; [33; 34; 35] – математичні моделі для прогнозування і методи керування всмоктуючим тиском ґрунту на основі нейронних мереж різної архітектури, технічна реалізація та програмне забезпечення АСК.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на 28 міжнародних науково-технічних конференціях: II Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми водного господарства та природокористування” (21-22.11.2007, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). 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; 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). Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (СИЕТ) (19-23.05.2008, 18-22.05.2009, 24-28.05.2010, Одеський національний політехнічний університет). Десятій міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» (20-24.05.2008, Інститут

прикладного системного аналізу Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”). Міжнародних конференціях 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). 10th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (24-28.02.2009, Поляна). III Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми водного господарства та природокористування» (21-23.10.2009, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). 10-й Ювілейній міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії», присвяченій 165-й річниці Національного університету «Львівська політехніка» (TCSET) (23-27.02.2010, Львів – Славське). Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті» (8-9.04.2010, Луцьк, Луцький національний технічний університет). 15-му Ювілейному Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті» (18-20.04.2011, Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки). Міжнародній науково-практичній конференції іноземних студентів «Розвиток національних економік в умовах глобалізації» (25-27.10.2012, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). Всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (22-23.02.2013, Рівне, Рівненський державний гуманітарний університет – Національний університет водного господарства та природокористування). III Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу» (10-15.02.2014, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування). I Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014» (16-17.04.2014, Київ, Національний технічний університет України «КПІ»).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 36 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук (з них 1 стаття входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus); 26 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій, з яких 2 тез входить до міжнародної наукометричної бази SCOPUS. 1 патент України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертаційна робота є рукописом і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел зі 135 найменувань (16 с.) та 11 додатків (81 с.). Загальний обсяг роботи складає 323 сторінки, у тому числі 161 сторінка основного тексту, 137 рисунків (з них 89 рисунків займають площу 50 с.), 41 таблиця (з них 23 таблиці займають площу 9 с.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, відомості про апробацію результатів дисертації та кількість публікацій за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі наведено аналіз функціонування зрошувального та осушувального землеробства, визначення еколого-економічних проблем його розвитку, аналіз існуючих методів керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур. Зазначено, що для 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 необхідно підвищити точність керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур завдяки оперативному врахуванню дії збурень на об'єкт, забезпечити отримання планової врожайності сільськогосподарських культур з одночасною економією водних та енергетичних ресурсів, автоматизувати осушувально-зволожувальні системи, використовуючи сучасні інформаційні технології та технічні засоби автоматизації. Сформульовано мету та задачі досліджень.

Другий розділ присвячено розробці математичних моделей вологопереносу в ненасиченій зоні модульної ділянки ґрунту. У якості типового об'єкту керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні обрано осушувально-зволожувальну систему (ОЗС) Рівненської дослідної сільськогосподарської станції площею 693 га.

Структурну схему каскадно-комбінованої АСК вологозабезпеченістю модульної ділянки ґрунту за допомогою зміни рівня ґрунтових вод наведено на рис. 1, 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; РО – регулюючий орган. Внутрішнім контуром регулювання є контур регулювання рівня води у керуючому колодязі (об'єкт керування ОК1), що вимірюється давачем LE1, а зовнішнім, задаючим, – контур регулювання всмоктуючого тиску ґрунту, який характеризує вологість. Об'єкт керування ОК2 представляє собою ділянку ґрунту з колекторно-дренажною системою. Він представлений на схемі у вигляді двох ланок. Перша ланка ОК2.1 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 $L_{гр.в.}$. Друга ланка ОК2.2 представляє собою ненасичену зону ґрунту і перетворює РГВ модульної ділянки на всмоктуючий тиск кореневмісного шару ґрунту W , що вимірюється давачем ME1.

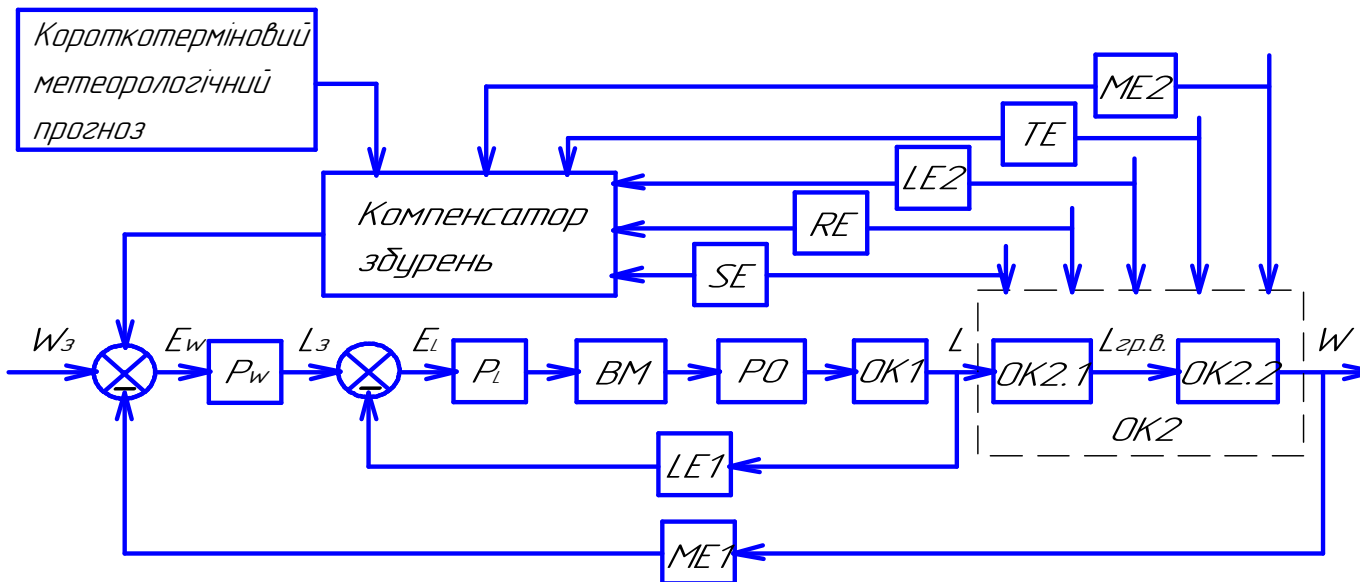


Рисунок 1 – Структурна схема касадно-комбінованої АСК вологозабезпеченістю модульної ділянки ґрунту за допомогою зміни рівня ґрунтових вод

На об'єкт керування ОК2 діють такі збурення: 1 – температура навколишнього середовища (ТЕ), 2 – опади (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.

Об'єкт керування ОК2.2 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 ОК2.1, 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 (НМ), побудованої на основі експериментальних даних. Для цього сформовано навчальну вибірку із експериментальних даних за 2 вегетаційні періоди двох суміжних років, яка включає 346 точок для моделювання вологозабезпечення сільськогосподарських рослин на керованому модулі меліоративної системи. Дані одного вегетаційного періоду використаємо для навчання (173 точки), а іншого – для тестування (173 точки). Система моделювання побудована для ґрунтів суглинистого та супіщаного механічного складу Рівненської дослідної сільськогосподарської станції. Вихідним параметром НМ 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, РГВ та поточних вологозапасів у ґрунті, НМ для прогнозування вологості представлено у вигляді:

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

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.

Проведено дослідження впливу глибини передісторії, методу навчання, виду функції активації та кількості нейронів прихованого шару, кількості прихованих шарів на точність роботи НМ (1). Найкращі результати показала багат шарова нейромережа такої архітектури: 3 нейрона першого шару з сигмоїдними функціями активації, 1 нейрон другого шару з лінійною функцією активації, метод навчання – Байєсівський, функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою, функція помилки – квадратична. Для моделювання ненасиченої зони ґрунту використано також гібридні нео-фаззі мережі, які поєднують у собі нечітку логіку та нейронні мережі. 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 μ_{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 – $x(k) = (x_1(k), x_2(k) \dots x_n(k))^T$, $k=1, 2 \dots N$ – представлена у вигляді:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i(k)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) \cdot w_{ji}(k), \quad (2)$$

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

У якості критерію навчання нео-фаззі нейрона використана стандартна квадратична похибка:

$$E(k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e^2(k) = \frac{1}{2} (d(k) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) \cdot w_{ji}(k))^2, \quad (3)$$

мінімізація якої за допомогою градієнтної процедури веде до алгоритму навчання:

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta \cdot e(k) \cdot \mu_{ji}(x_i(k)), \quad (4)$$

де $d(k)$ – зовнішній навчальний сигнал, η – параметр кроку пошуку, що вибирається із емпіричних міркувань і визначає швидкість збіжності процесу навчання.

Кожну змінну мережі (1) розбито на 6 рівних інтервалів з трикутними функціями належності (рис. 2), які задовольняють розбиттю Руспіні (5). Значення функції належності змінної x_i при цьому визначаємо за залежністю (6). Результати

роботи нейромоделей архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin та нео-фаззі мереж для прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту наведено у таблиці 1.

$$\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$\mu_{ji} = \begin{cases} \frac{x_i - c_{j-1,i}}{c_{ji} - c_{j-1,i}}, & x \in [c_{j-1,i}, c_{ji}], \\ \frac{c_{j+1,i} - x_i}{c_{j+1,i} - c_{ji}}, & x \in [c_{ji}, c_{j+1,i}], \\ 0 & \text{у інших випадках.} \end{cases} \quad (6)$$

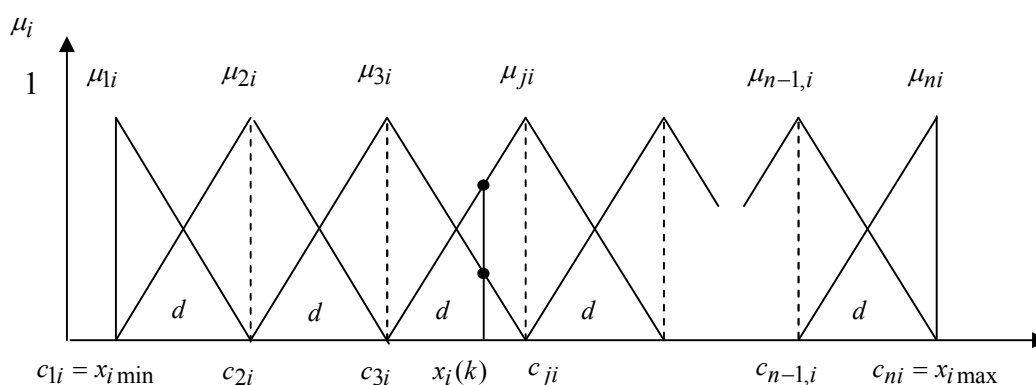


Рисунок 2 – Трикутні функції належності нео-фаззі нейрона

Максимальне значення середньоквадратичного відхилення (СКВ) для нео-фаззі мереж складає 1.036 м вод. ст. Результати тестування НМ для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту у шарі h=30-40 см наведено на рис. 3.

Таблиця 1 – Результати роботи нейромоделей архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin та нео-фаззі мереж для прогнозування всмоктуючого тиску у різних шарах ґрунту

Шар ґрунту	Середньоквадратичне відхилення, м вод. ст.			
	мережа Logsig-Purelin		нео-фаззі мережа	
	навчання	тестування	навчання	тестування
h=0-10 см	1.4383	1.2074	0.8268	1.036
h=10-20 см	2.0571	1.6472	0.625	0.6956
h=30-40 см	1.2102	0.8521	0.3093	0.2819

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. При керуванні всмоктуючим тиском

(вологістю) ґрунту достатньо забезпечити точність $\pm(5)\%$ об'ємної вологості. Перевірку адекватності розроблених нейромоделей проведено за допомогою F-критерію Фішера. Розроблені нео-фаззі моделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту забезпечують вищу точність роботи, ніж багат шарові мережі прямого поширення, мають простішу архітектуру, що забезпечує спрощення практичної реалізації та підвищення швидкості навчання.

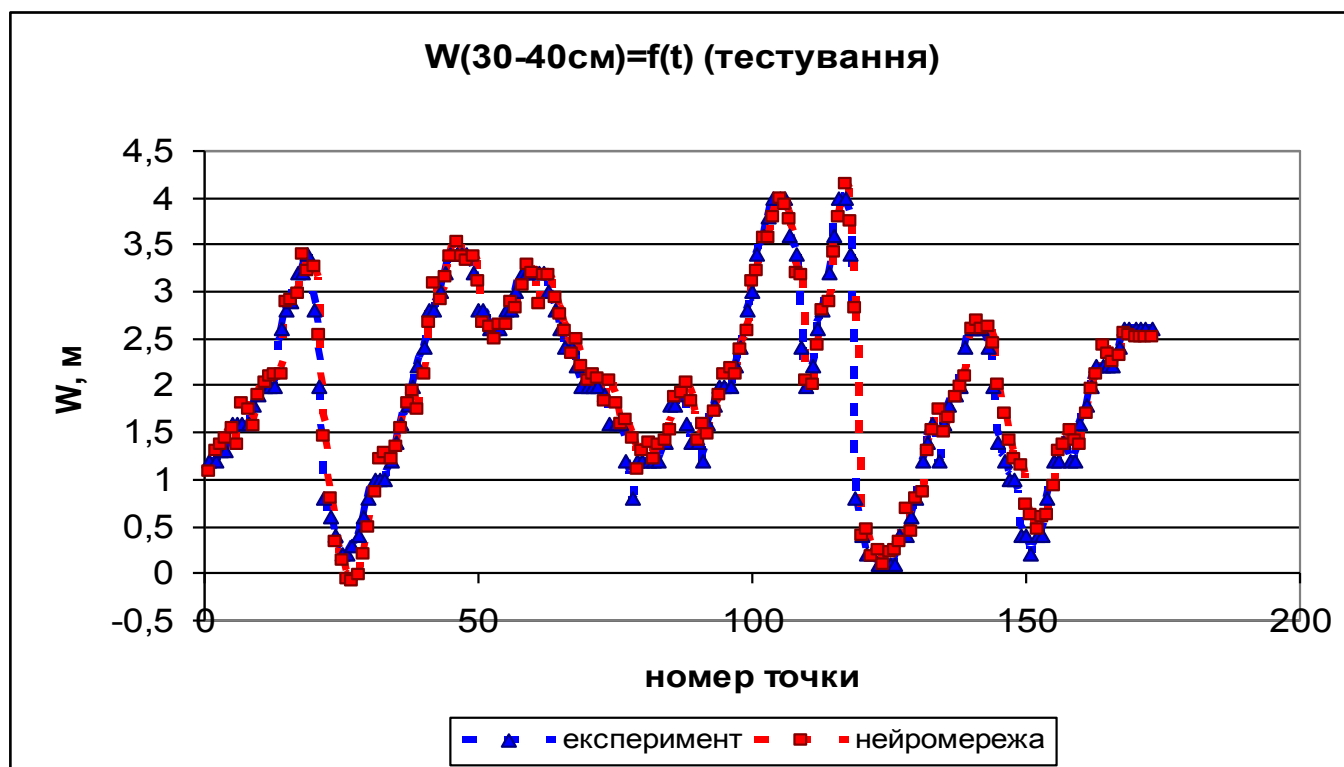


Рисунок 3 – Результати тестування нео-фаззі мережі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту у шарі $h=30-40$ см

Альтернативним способом є представлення математичної моделі ненасиченої зони ґрунту у вигляді диференційного рівняння вертикального вологопереносу (рівняння Річардса) (7), розрахунок якого проведено методом Ньютона-Рафсона:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} - k(\theta) \right] - I_{\theta}, \quad (7)$$

де θ – об'ємна вологість ґрунту, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $k = k(z, \theta)$ – коефіцієнт вологопереносу ґрунту, $\text{м}/\text{добу}$; $\psi = \psi(z, \theta)$ – капілярно-сорбційний потенціал (всмоктуючий тиск), м вод. ст. ; I_{θ} – об'єм води, який видаляється з одиниці об'єму ґрунту за одиницю часу (в основному це споживання води рослинами та фізичне випаровування), $\text{м}^3/\text{добу}$; z – вертикальна координата, напрямлена донизу; τ – час.

Коефіцієнт вологопровідності ґрунту визначено за залежністю Муалема-Ван Генухтена, а також за допомогою нейронних мереж такої архітектури: кількість нейронів першого шару – 4, кількість нейронів другого шару – 1, функція активації нейрону другого шару – лінійна, метод навчання – Левенберга-Марквардта, функція

налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою, функція помилки – квадратична. Значення СКВ при роботі моделі для шарів ґрунту 0-10, 10-20 та 30-40 см у порівнянні з експериментальними даними складають відповідно 1.77, 1.68 та 1.01 м вод. ст.

Розроблено також математичні моделі колекторно-дренажної системи та насиченої зони ґрунту.

Таким чином, розроблені прогнозуючі математичні моделі ненасиченої зони модульної ділянки ґрунту як об'єкту керування на основі статичних багатошарових штучних нейронних мереж прямого розповсюдження та нео-фаззі нейронних мереж дозволили підвищити точність прогнозування всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту; розроблений метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі статичних багатошарових штучних нейронних мереж прямого розповсюдження дозволив підвищити точність його визначення. 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.

У третьому розділі розроблено методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням дії збурень на основі нейронних мереж різної архітектури. Завданням зовнішнього, задаючого, регулятора АСК вологозабезпеченості (рис. 1) є визначення РГВ, який необхідно утримувати на модульній ділянці ОЗС протягом розрахункового періоду для забезпечення заданого значення всмоктуючого тиску ґрунту, враховуючи змінні метеопараметри, тому пропонується представити його у вигляді нейромережі виду:

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h), \quad (8)$$

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.

Проведено дослідження впливу глибини передісторії, методу навчання, виду функції активації та кількості нейронів прихованого шару, кількості прихованих шарів на точність роботи нейронного регулятора (8). Найкращі результати показала багатошарова нейромережа такої архітектури: 3 нейрона першого шару з сигмоїдними функціями активації, 1 нейрон другого шару з лінійною функцією активації, метод навчання, що реалізує різновид алгоритму зворотного поширення помилки у поєднанні з методом оптимізації Polak-Ribiere, функція налаштування ваг і зміщень – градієнтна з інерційною складовою, функція помилки – квадратична.

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 (8), 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.

Розроблено також нейрорегулятори виду (8) для визначення РГВ на базі нео-фаззі мереж. Результати роботи обох видів регуляторів наведено у таблиці 2. Результати тестування нео-фаззі регулятора для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарі $h=30-40$ см наведено на рис. 4. Розрахунок адекватності нейрорегуляторів виконано на основі F-критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0.05$.

Таблиця 2 – Результати роботи нейрорегуляторів архітектури 5-3-1, Logsig-Purelin та нео-фаззі регуляторів для визначення РГВ

Задаючий шар ґрунту	Середньоквадратичне відхилення, м			
	мережа Logsig-Purelin		нео-фаззі мережа	
	навчання	тестування	навчання	тестування
h=0-10 см	0.1272	0.0967	0.04751	0.05522
h=10-20 см	0.1356	0.1129	0.05113	0.05895
h=30-40 см	0.1333	0.1393	0.05464	0.06625



Рисунок 4 – Результати тестування нео-фаззі регулятора для визначення РГВ для забезпечення заданого всмоктуючого тиску ґрунту у шарі $h=30-40$ см

Згідно результатів роботи нео-фаззі мереж, 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.

Проведено моделювання роботи АСК вологозабезпеченістю у трьох шарах ґрунту та дослідження її динамічних властивостей. При цьому час регулювання складає 8.33-12.5 діб, час запізнення 2.1-4.1 доби, перегулювання 0%.

Для економії водних та енергетичних ресурсів при прийнятті кінцевого рішення про значення РГВ необхідно враховувати витрати на зміну РГВ та значення очікуваної врожайності. При цьому шукане значення РГВ належить відрізьку від поточного значення до розрахованого нейрорегулятором. Було застосовано метод підтримки прийняття рішення, а саме метод головного критерію, для визначення РГВ, який необхідно встановити на ОЗС. Головним критерієм при цьому обрано витрати на зміну РГВ, а відносна врожайність виступає у ролі обмеження: $k_{2,min} \leq k_2 \leq 1$. Відносну врожайність в залежності від вологості ґрунту розраховуємо за емпіричними формулами. Формуємо область допустимих рішень X^* , яка задовольняє заданим обмеженням. Тоді найкращим рішенням буде: $x = \arg \min_{x \in X^*} k_1$.

Розроблено також метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки з врахуванням випадкових погодних збурень. При цьому запропоновано щодня корегувати завдання по всмоктуючому тиску (вологості) ґрунту, враховуючи допустиму частку недополиву, що розраховується в залежності від метеопрогнозу опадів на наступний день за допомогою нечіткої логіки.

Таким чином, розроблені інтелектуальні методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового та крапельного зволоженні з врахуванням збурень дозволяють підвищити точність керування, оперативність процесу прийняття рішень, економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планових врожаїв.

У четвертому розділі розроблено апаратну частину АСК вологозабезпеченості на таких структурних одиницях: 1 – гідравлічний регулятор, оснащений мікропроцесорним блоком керування на основі двох мікроконтролерів фірми Microchip – PIC18F4620 і PIC16F690 – для вимірювання всмоктуючого тиску ґрунту, рівня води у керуючому колодязі, обміну даними з вимірювальною станцією (ВС) за допомогою радіозв'язку на основі модуля Radiocrafts по протоколу RC-232C, подачі керуючих сигналів на виконавчий механізм для зміни рівня води у керуючому колодязі і, відповідно, РГВ; 2 – ВС, оснащена мікропроцесорним блоком на основі двох мікроконтролерів PIC16F690 для вимірювання метеопараметрів, обміну даними з автоматизованим робочим місцем (АРМ) диспетчера за допомогою GSM модема SIM300C 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, обміну даними з ВС за допомогою GSM зв'язку, ведення загальної бази даних технологічних параметрів, візуалізації процесу і зв'язку з диспетчером, зв'язку з мережею Internet; 4 – переносний пульт керування оператора; 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 акумулятивної панелі із послідовним перетворювачем та стабілізатором вихідної напруги типу LM317A, високоємнісної нікель-кадмієвої акумуляторної батареї; 7 – давачі технологічних параметрів: рівня води у керуючому колодязі, всмоктуючого тиску ґрунту, вологості повітря, температури повітря, кількості опадів. Структуру АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з підґрунтовим зволоженням наведено на рис. 5, де Cws – регулятор водоподачі; Cdf – регулятор дренажного стоку; ВС – вимірювальна станція; АРМ – автоматизоване робоче місце оператора; ME-1-1 – давач всмоктуючого тиску ґрунту, LE-2-1 – давач рівня води у керуючому колодязі, TE-3-1 – давач температури повітря, ME-4-1 – давач відносної вологості повітря, LE-5-1 – давач опадів.

Вдосконалено 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. Розроблено програмне забезпечення для нижнього та верхнього рівнів АСК. Роботу АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні передбачено в автоматичному, автоматичному водото- та енергозберігаючому, ручному за місцем і дистанційному режимах, для роботи яких розроблено програмне забезпечення для всіх вузлів системи керування. У програмне забезпечення АРМ при цьому включено дві ОЗС: Рівненську та Обухівську.

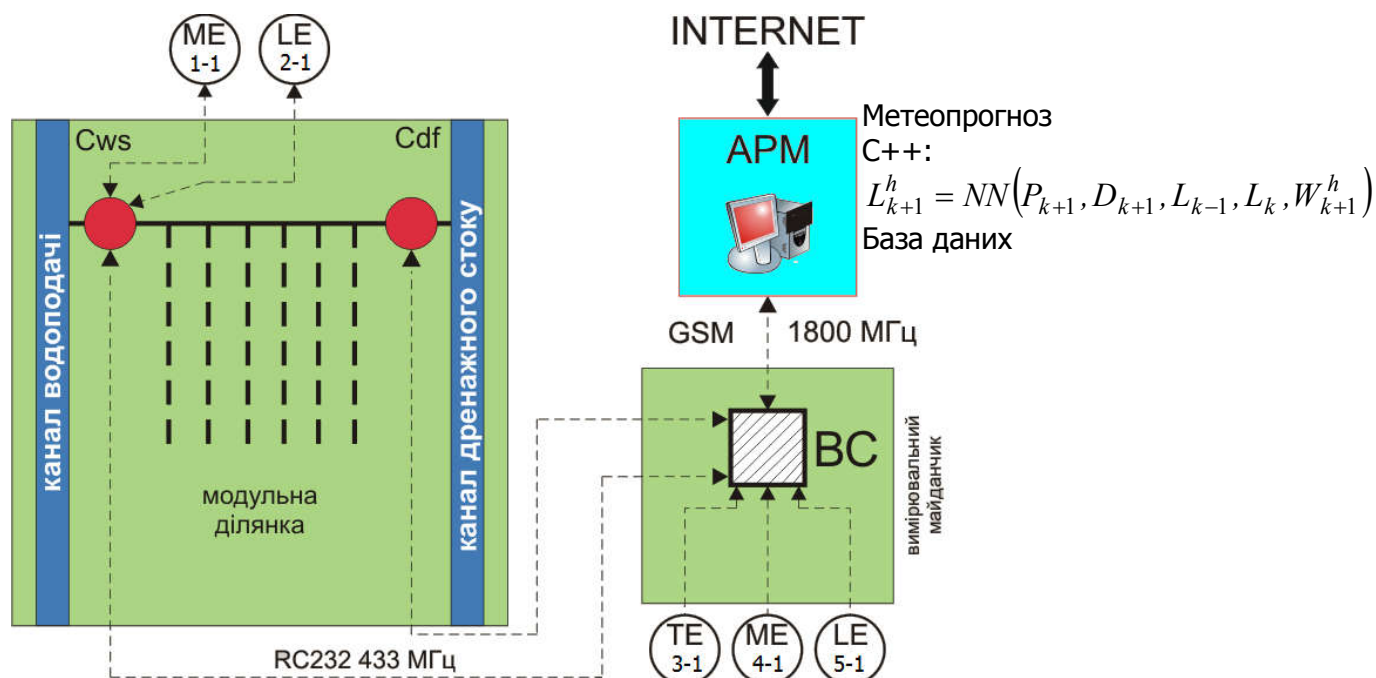


Рисунок 5 – Структура АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки з підґрунтовим зволоженням

Показана можливість адаптації розроблених моделей для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та методів керування вологозабезпеченістю

сільськогосподарських культур до різних ОЗС з підґрунтовим зволоженням. Впровадження результатів дисертаційної роботи виконано в Обухівському міжрайонному управлінні водного господарства. Розроблені моделі для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та визначення задаючого значення РГВ на розрахунковий період на базі нео-фаззі мереж. Для навчання нейронних мереж сформовано базу даних із 428 точок, тестувальну вибірку даних – із 214 точок. Перевірка адекватності нейромоделей проведена за допомогою F-критерію Фішера. Результати роботи нео-фаззі мереж для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та визначення необхідного РГВ для Обухівської ОЗС наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати роботи нео-фаззі мереж для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та визначення необхідного РГВ для Обухівської ОЗС

Шар ґрунту	Кількість точок		СКВ, м вод. ст.		СКВ, м	
	навчання	тестування	навчання	тестування	навчання	тестування
h=0-10 см	428	214	0.05682	0.03125	0.02429	0.005832
h=10-20 см			0.03207	0.01649	0.01487	0.004278
h=30-40 см			0.01108	0.008316	0.01033	0.005748

У додатках наведено схеми, допоміжні матеріали, навчальні та тестувальні вибірки даних для нейронних мереж, акти впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво та навчальний процес.

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. 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 АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні за допомогою зміни рівня ґрунтових вод.

3. Розроблено нові 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.

4. Розроблено новий метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі статичних багат шарових нейронних мереж прямого розповсюдження, що дозволило суттєво 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 АСК 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 (ПЗ) 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 АСК вологозабезпеченістю та програмне забезпечення для всіх вузлів системи.

11. Результати 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 у Національному університеті водного господарства та природокористування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.

2. 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.

3. Пастушенко В.Й. Використання нео-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. (Входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

4. Пастушенко В.Й. Управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських рослин при підґрунтовому зволоженні на основі нечіткої логіки / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко. – Рівне : Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. – Выпуск 4 (40). Частина 1. – Рівне, 2007. – С. 342–349.

5. 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. – Выпуск 147. – С. 46–52.

6. Пастушенко В.Й. Принципи побудови інтелектуальної системи керування вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Выпуск 3 (47). Частина 1. – Рівне, 2009. – С. 187–194.

7. 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. Выпуск 27. – Луцьк, 2010. – С. 264–269.

8. Пастушенко В.Й. Прогнозування вологості ненасиченої зони ґрунту на основі нео-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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Пастушенко В.Й. Інтелектуальна система прийняття рішень при керуванні режимами зволоження сільськогосподарських культур на базі нейронної мережі // В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Матеріали Х 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.

15. 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 (Zakarpattia), 2009. – P. 121–124. (Входить до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.)

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. Пастушенко В.Й. Методика керування вологістю ґрунту при вирощуванні сільськогосподарських культур на системах з підґрунтовим зволоженням на базі нейромережових 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.

20. 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. (Входить до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.)

21. Пастушенко В.Й. Ідентифікація коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейромережових 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Стеценко А.М. Розробка інтелектуальних алгоритмів керування вологістю ґрунту. / А.М. Стеценко, В.Й. Пастушенко // Матеріали XV Міжнародного молодіжного форуму «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». Том 9. Харьков, 18-20 апреля 2011. – С. 43–44.

26. Пастушенко В.Й. Автоматизація процесу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового 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.

27. 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.

28. Пастушенко В.Й. Використання neo-fuzzy мережі для керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового 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.

29. 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.

30. Пастушенко В.Й. Обґрунтування математичної моделі вологопереносу в системах автоматизації вологозабезпечення сільськогосподарських культур / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів. Матеріали конференції 22–23 лютого 2013, Рівне. – С. 119.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. Стеценко А.М. Автоматизована система керування вологістю ґрунту на меліоративних системах з підґрунтовым зволоженням на базі нейронних мереж / А.М. Стеценко // Матеріали XXII міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2015» (10-11 вересня 2015 р., м. Одеса). – Одеса : ТЕС, 2015. – С. 184–186.

АНОТАЦІЯ

Стеценко А.М. Автоматизоване керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні з врахуванням збурень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за

спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки 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.

У роботі розроблено методи керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні на основі спеціалізованих штучних нейронних мереж та структура контурів керування, що дозволило підвищити точність керування вологозабезпеченістю, оперативність процесу прийняття рішень. Побудовано математичні моделі ненасиченої зони модульної ділянки ґрунту як об'єкту керування на основі спеціалізованих штучних нейронних мереж, що дозволило підвищити точність прогнозування всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту. Розроблено метод параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі нейронних мереж, що дозволило суттєво підвищити точність його визначення. Розроблено метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки з врахуванням впливу випадкових збурень на об'єкт.

Удосконалена структура гідравлічного регулятора вологості кореневого шару ґрунту двосторонньої дії. Застосовано інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності в задачах оптимального керування вологозабезпеченістю, що дозволило економити водні та енергетичні ресурси з одночасним забезпеченням отримання планового врожаю сільськогосподарських культур. Розроблено апаратну частину та програмне забезпечення автоматизованої системи керування вологозабезпеченістю.

Ключові слова: автоматизована система керування, нейронна мережа, нечітка логіка, гідравлічний регулятор, осушувально-зволожувальна система, модульна ділянка ґрунту, всмоктуючий тиск та вологість ґрунту, рівень ґрунтових вод.

АННОТАЦІЯ

Стеценко А.М. Автоматизированное управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур при подпочвенном увлажнении с учётом возмущений. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи разработки моделей и методов управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур на осушительно-увлажнительных системах (ОУС) с подпочвенным увлажнением для повышения эффективности функционирования

этих систем и обеспечения получения гарантированных урожаев сельскохозяйственных культур с одновременной экономией водных и энергетических ресурсов.

В работе разработана каскадно-комбинированная структурная схема автоматизированной системы управления (АСУ) влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур при подпочвенном увлажнении с помощью изменения уровня грунтовых вод.

Разработаны новые математические модели влагопереноса в ненасыщенной зоне модульного участка почвы на основе статических многослойных нейронных сетей прямого распространения разной архитектуры и нео-фаззи сетей. Проведено математическое моделирование процесса влагопереноса в ненасыщенной зоне почвы на базе дифференциального уравнения методом Ньютона-Рафсона, разработана математическая модель коллекторно-дренажной системы и насыщенной зоны почвы. Построенные нейромодели могут использоваться для проверки эффективности работы разных методов управления, а также в составе автоматизированного рабочего места (АРМ) диспетчера ОУС и служить удобным инструментом для планирования и управления режимами увлажнения сельскохозяйственных культур.

Разработан метод параметрической идентификации коэффициента влагопроводности ненасыщенной зоны почвы на основе статических многослойных нейронных сетей прямого распространения, что позволило существенно повысить точность его определения по сравнению с использованием эмпирических формул.

Разработаны новые методы управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур при подпочвенном увлажнении с учетом действия возмущений на основе статических многослойных нейронных сетей прямого распространения разной архитектуры и нео-фаззи сетей, что позволило повысить точность управления влажностью почвы путем оперативного учёта влияния возмущений. Используются интеллектуальные методы управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур, что позволило экономит водне и энергетические ресурсы с одновременным обеспечением получения планового урожая. Проведено моделирование АСУ влагообеспеченностью, исследованы её динамические свойства.

Разработан метод управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур при капельном увлажнении на основе нечёткой логики с учётом влияния случайных возмущений на объект.

Усовершенствована структура гидравлического регулятора влажности корневого слоя почвы двустороннего действия, в которую введены дополнительные электромагнитные клапаны, датчики уровня воды, количества осадков, температуры и относительной влажности воздуха, скорости ветра и микропроцессорный блок управления, оснащённый беспроводным интерфейсом связи, что позволило повысить скорость работы и обработки информации, точность управления влажностью корневого слоя почвы.

Для обучения и тестирования нео-фаззи сетей разработано программное обеспечение, которое является универсальным и может использоваться для разных ОУС с подпочвенным увлажнением. Для перенастройки на другую ОУС достаточно

заменить текстовые файлы с обучающими и тестирующими данными, сама программа при этом остаётся неизменной.

Разработана аппаратная часть АСУ влагообеспеченностью, которая состоит из таких структурных единиц: 1 – гидравлический регулятор, 2 – измерительная станция, 3 – АРМ диспетчера ОУС на базе ПК, 4 – переносной пульт управления, 5 – блок дискретных силовых выходов для управления электромагнитными клапанами гидравлического регулятора, 6 – блок контроля напряжения, 7 – датчики технологических параметров. Работу АСУ влажностью почвы при подпочвенном увлажнении предусмотрено в таких режимах: автоматический, автоматический водо- и энергосберегающий, ручной дистанционный, ручной по месту. Согласно этих тренировок разработано программное обеспечение для всех узлов системы управления.

Внедрение материалов научных и технических разработок диссертационной работы проведено в Обуховском межрайонном управлении водного хозяйства. Показана возможность адаптации разработанных моделей для прогнозирования всасывающего давления почвы и методов управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур к разным ОУС с подпочвенным увлажнением. Результаты диссертационных исследований используются также в учебном процессе в Национальном университете водного хозяйства и природопользования при подготовке специалистов по специальности «Автоматизированное управление технологическими процессами», в НИР студентов, подготовке дипломных проектов и магистерских работ.

Введение АСУ влагообеспеченностью на основе современных технических средств автоматизации, интеллектуальных методов управления, использование централизованного пункта сбора данных и управления позволяет: обеспечить заданную точность управления с одновременной экономией водных и энергетических ресурсов; обеспечить получение плановых урожаев сельскохозяйственных культур; вести централизованную базу данных технологических параметров; обеспечить функционирование системы управления в разных режимах (автоматическом, ручном дистанционном, ручном по месту); улучшить условия труда обслуживающего персонала; повысить эффективность и надёжность работы ОУС.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, нейронная сеть, нечеткая логика, гидравлический регулятор, осушительно-увлажнительная система, модульный участок почвы, всасывающее давление и влажность почвы, уровень грунтовых вод.

ABSTRACT

Stetsenko A.M. Automated control of agricultural cultures' water well-being upon underground moistening with disturbances' detection. – The manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences (Ph.D.) degree in specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

Dissertation is devoted to the decision of actual scientific and technical task of design of models and control methods of agricultural cultures' water well-being on the

drained-humidifying systems with underground moistening for rising of these systems' functioning and ensuring receiving of guaranteed agricultural cultures' harvest with simultaneous economy of water and energy resources.

In the work the control methods of agricultural cultures' water well-being upon underground moistening on the bases of specialized artificial neural networks and structure of control loops are developed. This has allowed increasing the control precision of water well-being, efficiency of decision-making process. The mathematical models of non-saturated part of soil as the control object on the bases of specialized artificial neural networks are built. This has allowed increasing of the soil's pressure head (moisture) prediction's precision. The method of parametric identification of coefficient of hydraulic conductivity of non-saturated part of soil on the bases of neural networks is developed. This has allowed essential increasing of coefficient of hydraulic conductivity definition's precision. The control method of agricultural cultures' water well-being upon drop irrigation on the bases of fuzzy logic with disturbances' on the object detection is developed.

The structure of double-sided action hydraulic controller of root-inhabited soil's part moisture is improved. The intellectual methods of supporting of decision-making under multi-criterion conditions in the tasks of water well-being optimal control have been applied. This has allowed economizing water and energy resources with simultaneous guaranteeing of planned agricultural cultures' harvest's receiving. The hardware and software components of automated control system of water well-being are developed.

Keywords: automated control system, neural network, fuzzy logic, hydraulic controller, drained-humidifying system, modular part of soil, pressure head and soil's moisture, groundwater level.

Підписано до друку 14.04.2017 р. Формат 60×90¹/₁₆.
Папір друкарський № 1. Гарнітура Times.
Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Зам. № 5292.

*Видавець і виготовлювач
Редакційно-видавничий відділ Національного університету
водного господарства та природокористування,
33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*