

УДК 631.432:626.86

В.Й.Пастушенко, А.М.Стеценко

Національний університет водного господарства та природокористування

НЕЙРО-НЕЧІТКИЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ОСУШУВАЛЬНО-ЗВОЛОЖУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ З ПІДГРУНТОВИМ ЗВОЛОЖЕННЯМ

В роботі розроблено структуру і алгоритм роботи автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур у межах модульної ділянки при підґрунтового зволоженні. Моделювання проведено в редакторі Simulink системи Matlab. Запропоновано технічну реалізацію АСК.

Ключові слова: *нейро-нечіткий регулятор, вологозабезпечення, підґрунтове зволоження, осушувальні схеми, зволожувальні схеми.*

Для досягнення максимально можливого врожаю при вирощуванні сільськогосподарських культур необхідно забезпечити їх усіма необхідними ресурсами, що якнайкраще сприяють їх зростанню і розвитку. Одним з найважливіших факторів росту рослин є водно-повітряний режим ґрунту, який на осушувально-зволожувальних системах (ОЗС) з підґрунтовим зволоженням регулюється шляхом зміни рівня ґрунтових вод (РГВ). Крім РГВ, на вологість ґрунту здійснюють вплив випадково змінні погодні фактори: опади, температура та вологість повітря, сонячна радіація, вітер. 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.

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 [1]. У роботах [2, 3] розроблені методики розрахунку режимів управління РГВ при підґрунтового зволоженні, запропоновані технічні засоби автоматизації. Однак, залишаються відкритими питання адаптації і самонавчання автоматизованих систем керування вологістю ґрунту в умовах дії випадкових погодних факторів і зміни характеристик об'єкта керування, питання зниження енергетичних і водних затрат.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування ОЗС з підґрунтовим зволоженням для забезпечення стабільного врожаю сільськогосподарських культур шляхом оперативної корекції рівня ґрунтових вод в залежності від змін параметрів об'єкта керування.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлено задачу розробки структури, алгоритму роботи та технічної реалізації інтелектуальної автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на ОЗС з підґрунтовим зволоженням з врахуванням дії стохастичних збурюючих факторів на об'єкт керування.

Інтелектуальні системи керування – це системи керування (СК), здатні до «розуміння» і навчання по відношенню до об'єкта керування, збурень, зовнішнього середовища і умов роботи. Основна відмінність інтелектуальних систем – наявність механізму системної обробки знань. Головна архітектурна особливість, яка відрізняє інтелектуальні СК від звичайних, – це механізм отримання, зберігання і обробки знань для реалізації своїх функцій [4]. Інтелектуальні СК будуються на основі принципу ситуаційного керування, коли керуючий вплив формується на основі аналізу зовнішніх подій, і використання сучасних інформаційних технологій обробки знань, таких як експертні системи, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми тощо.

Структура АСК вологістю ґрунту за допомогою зміни РГВ являє собою каскадно-комбіновану систему, наведену на рис. 1.

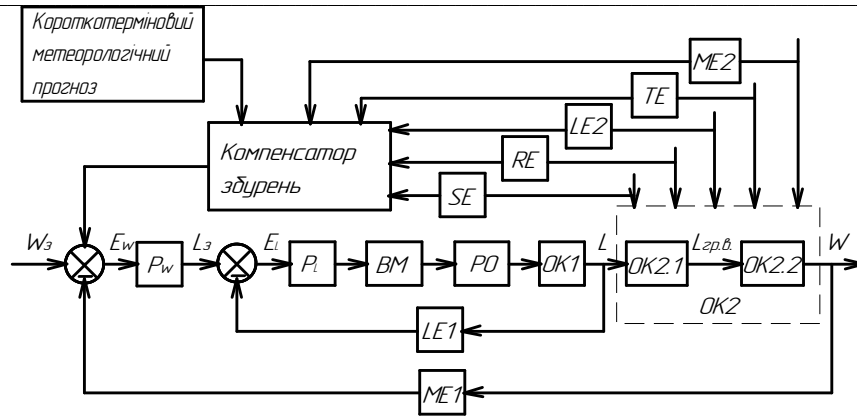


Рис. 1. Структурна схема каскадно-комбінованої автоматизованої системи керування вологістю ґрунту за допомогою зміни рівня ґрунтових вод: W_3 – задана вологість ґрунту, W – реальна вологість ґрунту, $E_w = W_3 - W$ – різниця між заданою і реальною вологістю ґрунту; L_3 – заданий рівень води у керуючому колодязі; L – реальний рівень води у керуючому колодязі; $E_L = L_3 - L$ – різниця між заданим і реальним рівнем води у керуючому колодязі; $L_{гр.в.}$ – рівень ґрунтових вод, P_w – регулятор вологості ґрунту, P_L – регулятор рівня води у керуючому колодязі, BM – виконавчий механізм, PO – регулюючий орган, $OK1$ – об’єкт керування №1 (керуючий колодязь), $OK2$ – об’єкт керування №2 (ґрунтовий масив), $LE1$ – давач рівня води у керуючому колодязі, $ME1$ – давач вологості ґрунту, $ME2$ – давач вологості повітря, TE – давач температури повітря, $LE2$ – опадомір, RE – давач освітленості, SE – давач швидкості вітру

Внутрішнім контуром керування є контур керування рівнем води у керуючому колодязі (об’єкт керування $OK1$), а зовнішнім, задаючим, - контур керування вологістю ґрунту. Об’єкт керування $OK2$ представляє собою ділянку ґрунту з колекторно-дренажною системою. Він представлений на схемі у вигляді двох ланок. Перша ланка $OK2.1$ відображає колекторно-дренажну систему та насичену зону ґрунту і перетворює рівень води у керуючому колодязі на напір у дренажній системі, а напір – на РГВ ($L_{гр.в.}$). Друга ланка $OK2.2$ представляє собою ненасичену зону ґрунту і перетворює РГВ модульної ділянки у вологість кореневмісного шару ґрунту W . На об’єкт керування $OK2$ діють наступні збурення: 1-температура навколишнього середовища, 2-опаді, 3-освітленість, 4-швидкість вітру, 5-відносна вологість повітря, 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. Завданням зовнішнього контуру керування є оперативна корекція задаючого значення РГВ в залежності від зміни параметрів $OK2$ під дією випадкових збурюючих факторів, а також прогнозування цих змін на основі даних метеопрогнозу.

Об’єкт керування $OK2.2$ представляє собою ненасичену зону ґрунту і перетворює РГВ модульної ділянки у вологість кореневмісного шару ґрунту. Крім РГВ, що є вихідною величиною об’єкта керування $OK2.1$, на об’єкт діє ряд стохастично змінних збурень. За таких умов пропонується представити модель об’єкта керування 2.2 у вигляді побудованої на основі експериментальних даних нейронної мережі (НМ) виду

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

де вхідними параметрами є кількість опадів P (мм), дефіцит вологості повітря D (мбар), рівень ґрунтових вод L (РГВ) 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.

Побудова, навчання і тестування нейронних мереж проводилося у нейроемуляторі NeuroPro та редакторі Neural Network Toolbox (редактор для роботи з нейронними мережами) системи MatLab. При цьому використовувалися мережі різної архітектури: багатошарова, узагальнено-регресійна, лінійна, мережа з радіальними базисними елементами, мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці. Найкращі результати при навчанні і тестуванні показала лінійна нейромережа для всіх шарів ґрунту (0-10, 10-20, 30-40 см), © В.Й.Пастушенко, А.М.Стеценко

яку і використано при моделюванні АСК вологістю ґрунту. Результати навчання нейронної мережі для моделювання шару ґрунту 30-40 см наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати навчання нейронної мережі для моделювання шару ґрунту 30-40 см

№	Нейронна мережа	К-сть входів	К-сть точок		Сер.-квадратична похибка		Нейроемулятор
			навчання	тестування	навчання	тестування	
1	багатшарова	11	162	153	0.0088	0.3749	NeuroPro
2	регресійна				0.1685	0.8786	
3	лінійна				0.2470	0.2592	
4	мережа з радіальними базисними елементами				0.0781	0.4411	
5	мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці				4.0893e-015	0.9738	

В АСК вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні необхідно з певною періодичністю, яка залежить від інерційності об'єкта керування і системи в цілому, змінювати уставку потрібного РГВ, який необхідно утримувати на модульній ділянці. При цьому потрібно враховувати стохастичні збуджуючі фактори: погодні умови та короткотерміновий метеопрогноз. Тому пропонується представити регулятор всмоктуючого тиску ґрунту (вологості ґрунту) у вигляді системи нейрончїткого виведення виду:

$$L_{k+1} = NN(P_k, P_{k+1}, D_k, D_{k+1}, W_k^h, W_{k+1}^h, L_k), \quad (2)$$

де входними 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 (РГВ) від світлової поверхні (м). $NN(\)$ - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею; k - поточний крок.

Нечітка НМ – це багатшарова НМ, в якій шари виконують функції системи нечіткого виведення. Нейрони даної мережі характеризуються набором параметрів, налаштування яких здійснюється у процесі навчання, як у звичайних НМ [4]. Для навчання мережі та генерації системи нечіткого виведення використано редактор нечітких нейронних мереж Anfis Editor системи Matlab. Структура системи нейрончїткого виведення наступна: система нечіткого виведення типу Сугено, метод оптимізації – гібридний, входів –7, спосіб розбиття входних змінних – субтрактивна кластеризація, вихід – 1, форма функцій приналежності входних змінних – криві Гауса, функції приналежності вихідної змінної – лінійні. Під час росту рослини проходять декілька фаз розвитку, під час яких відбувається розвиток як наземної, так і підземної (кореневої) частин. У зв'язку з цим розроблено декілька регуляторів виду (2), орієнтованих на керування вологістю ґрунту у певному його шарі (0-10, 10-20, 30-40 см) та середньою вологістю у шарі 0-40 см. Перемикання між регуляторами здійснюється по мірі розвитку кореневої системи рослини.

Моделювання всієї АСК вологістю ґрунту в межах модульної ділянки ОЗС проводилося засобами редактора Simulink системи Matlab. При моделюванні АСК використовувалися наступні передаточні функції компонентів: регулятор рівня води у керуючому колодязі – пропорційна та інтегруюча ланки, запірний орган та керуючий колодязь – аперіодичні ланки першого порядку, колекторно-дренажна систему та насичена зона ґрунту – аперіодична ланка другого порядку та ланка запізнення. Параметри передаточних функцій компонентів визначалися експериментальним шляхом.

Результати моделювання АСК вологістю ґрунту у шарі 30-40 см представлені на рис. 2.

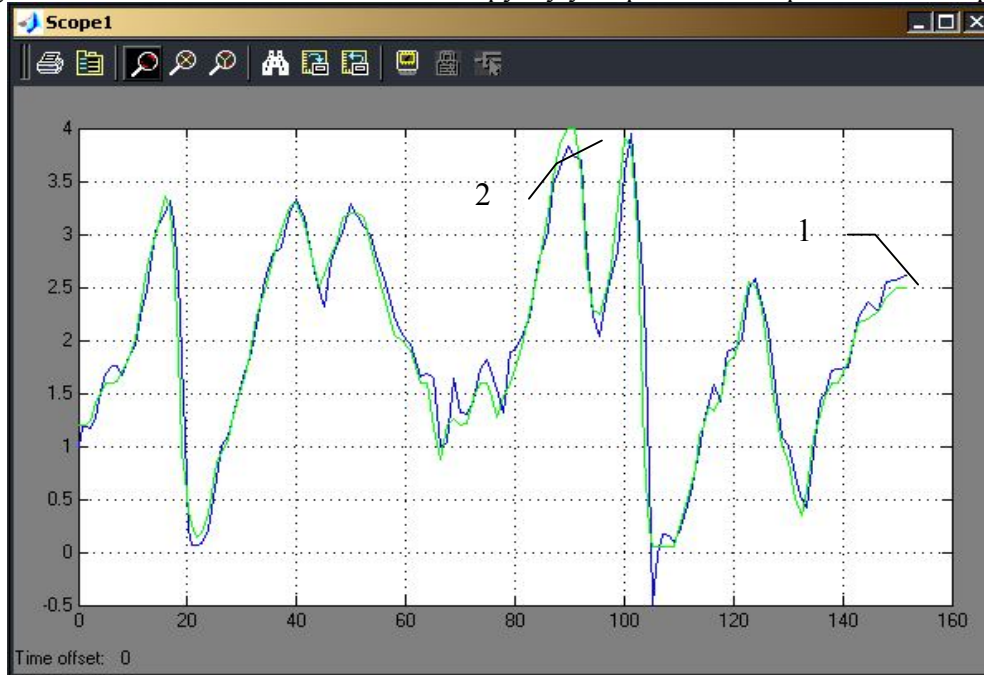


Рис. 2. Зміна всмоктуючого тиску у шарі ґрунту 30-40 см:

- 1 ————— - результати моделювання;
2 ————— - тестова незалежна вибірка даних

Метою керування водно-повітряним режимом ґрунту є отримання планового врожаю сільськогосподарських культур. Для кількісної оцінки врожаю вченими Інституту гідротехніки і меліорації (м. Київ), зокрема Ковальчуком П.І. у роботі [6, с. 129], запропонована наступна нелінійна модель у вигляді добутку двох функцій:

$$y = F(W_1 \dots W_n) \cdot y^p(\theta_1 \dots \theta_n), \quad (3)$$

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 [3, с. 129].

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

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) \cdot f_2(W_2) \cdot \dots \cdot f_n(W_n), \quad (4)$$

для другого типу – суми функцій окремих періодів:

$$\frac{y}{y^p(\theta)} = f_1(W_1) + f_2(W_2) + \dots + f_n(W_n), \quad (5)$$

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 (5) можна подати у вигляді системи рівнянь блокового типу:

$$y_i^p = f_i(W_i) \cdot y_{i-1}^p(\theta), \quad i \in [1; n], \quad (6)$$

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 $f_i(W_i) = 1$.

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 нейро-нечітким регулятором (2). 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. Вологість ґрунту визначатиметься за навченою нейромоделлю об'єкта керування (1). Відносну врожайність на кожній фазі розвитку рослин визначатимемо за моделями 4 або 5. В результаті отримаємо множину можливих рішень визначення необхідного РГВ, наведену у таблиці 2.

Таблиця 2

Множина можливих рішень визначення необхідного РГВ

Рішення $x_i \in X$	РГВ $L_i \in [L_{curr}; L_{task}]$	Вологість 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_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 прийняття рішення (принцип головного критерію, функціонально-вартісний аналіз, принцип послідовної оптимізації, схема максимальної загальної корисності, схема максимуму), визначаємо, який РГВ необхідно встановити на ОЗС, з врахуванням фінансових витрат та очікуваної врожайності. Наприклад, при застосуванні принципу головного критерію, визначаємо, який критерій є головним. Другий критерій виступатиме у ролі обмеження. Так, якщо головним критерієм є витрати на зміну РГВ, то відносна врожайність виступатиме у ролі обмеження:

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

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

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

Технічно АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні пропонується реалізувати на таких структурних одиницях: 1 – гідравлічний регулятор, оснащений мікропроцесорним блоком керування на основі двох мікроконтролерів - PIC18F4620 і

РІС16F690 - для вимірювання всмоктуючого тиску (вологості) ґрунту, рівня води у керуючому колодязі, обміну даними з вимірювальною станцією за допомогою радіозв'язку на основі модуля RC 102, подачі керуючих сигналів на виконавчий механізм для зміни рівня води у керуючому колодязі і, відповідно, РГВ; 2 – вимірювальна станція, оснащена мікропроцесорним блоком на основі мікроконтролера РІС 16F690 для вимірювання метеопараметрів (температури та відносної вологості повітря, кількості опадів), обміну даними з автоматизованим робочим місцем (АРМ) диспетчера за допомогою GSM зв'язку та мікропроцесорними блоками гідравлічних регуляторів за допомогою радіозв'язку; 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.

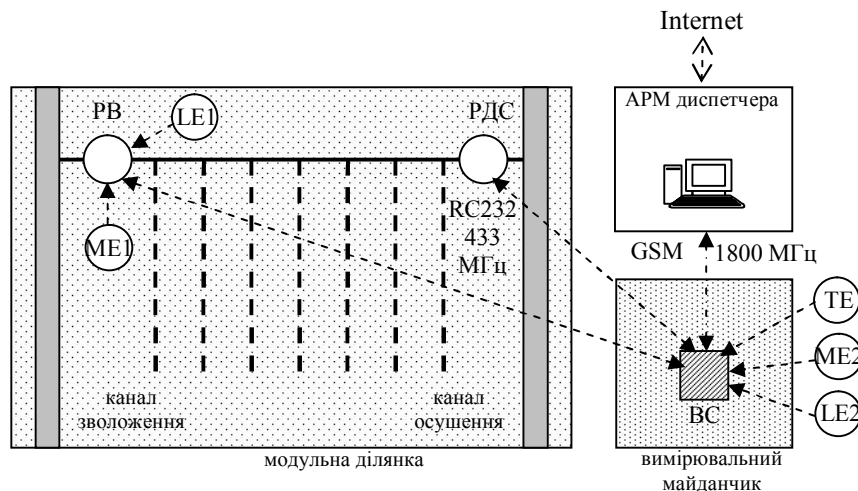


Рис. 3. Структура інтелектуальної АСК вологості ґрунту при підґрунтовому зволоженні у межах модульної ділянки: РВ – регулятор водо подачі, РДС – регулятор дренажного стоку, ВС – вимірювальна станція, АРМ – автоматизоване робоче місце, LE1 – давач рівня води у керуючому колодязі, ME1 – давач всмоктуючого тиску ґрунту, ME2 – давач вологості повітря, TE – давач температури повітря, LE2 – давач опадів

Таким чином, розроблена АСК вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтовому зволоженні дозволить підвищити точність керування завдяки оперативному врахуванню стохастичних збурень на об'єкт і забезпечити отримання планової врожайності при раціональному використанні енергетичних і водних ресурсів.

1. Науково-методичні та організаційні засади управління водогосподарсько-меліоративними об'єктами гумідної зони України за короткотерміновим метеорологічним прогнозом. Методичні рекомендації. / д. т. н. А.М. Рокочинський, Я.Я. Зубик, Л.В. Зубик, Є.І. Покладньов; за участю спеціалістів Держводгоспу України к. т. н. В.А. Сташук, В.Д. Крученко. – НУВГП, Рівне, 2005, 53 с.
2. П.І. Коваленко, М.В. Яцик, В.Л. Поляков Управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на меліорованих землях з урахуванням динаміки факторів зовнішнього середовища. // Меліорація і водне господарство.- 1996.- Вип. 82.
3. В.Й. Пастушенко, С.К. Матус, С.О. Терновцов Інформаційне забезпечення систем управління вологозабезпеченістю на осушувально-зволожувальних системах з підґрунтовым зволоженням. – Рівне, „Вісник НУВГП”, 2007.
4. А.А. Усков, А.В. Кузьмін Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика. – Москва. Горячая линия – Телеком, 2004.- 143 с.
5. С.Ю. Бочаров Автоматизация водорегулирующих комплексов. – Ровно, 2000.- 109 с.
6. П. І. Ковальчук. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища: Навчальний посібник. – Київ: Либідь, 2003.- 208 с.