

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЛЕОНІД ЛЄВІ

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В ІДЕНТИФІКАЦІЇ І КЕРУВАННІ СКЛАДНИМИ ТЕХНІЧНИМИ
ОБ'ЄКТАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Монографія

Полтава

2021

УДК 681.513:62-58
ББК 39.71-082.02
Л 36

*Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
протокол № 8 від 31.05.2021 р.*

Рецензенти:

Ковальчук П.І. – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник відділу екології водних екосистем та охорони вод (Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України);

Любчик Л.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних (Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут»);

Осадчий С.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів (Центральноукраїнський національний технічний університет)

Леві Л.І. Інтелектуальні інформаційні технології в ідентифікації і керуванні складними технічними об'єктами в умовах невизначеності: [монографія]. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 194 с.

На основі використання запропонованих у монографії наукових положень розроблені інтелектуальні інформаційні технології керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності (на прикладі зрошувальних систем). Метою дослідження є розроблення моделей і методів створення інтелектуальних інформаційних технологій обробки нечіткої вхідної інформації та підтримки прийняття рішень щодо формування потрібних режимів функціонування. Розроблену технологію реалізовано у вигляді комп'ютерної системи підтримки прийняття діагностичних рішень, яка забезпечує можливість розрахунку параметрів функціонування в реальних умовах виробництва.

Для наукових та інженерно-технічних працівників у галузі проектування та впровадження інформаційних технологій керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності, аспірантів та студентів.

ISBN 978-966-97872-3-1

© Леві Л. І., 2021
© Національний університет
«Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка», 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМИ ТЕХНІЧНИМИ ОБ’ЄКТАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ (НА ПРИКЛАДІ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ)	10
1.1. Аналіз сучасних концепцій моделювання процесів прийняття рішень ..	10
1.2. Діагностування як метод підтримки оптимального водного режиму.....	14
1.3. Методи визначення строків і норм поливів	15
1.4. Аналіз методів визначення ґрунтової вологи	17
1.5. Аналіз існуючих режимів зрошення	25
1.5.1. Біологічно оптимальний режим зрошення	26
1.5.2. Оптимально екологічно безпечний режим зрошення.....	27
1.5.3. Водозберігаючий режим зрошення.....	27
1.5.4. Ґрунтозахисний режим зрошення.....	28
1.6. Інформаційно-обчислювальні системи оперативного планування зрошення	29
1.7. Класифікація сучасних методів планування зрошення	30
1.8. Формулювання наукової проблеми та постановка задач дослідження ...	31
Висновки за розділом 1	33
РОЗДІЛ 2. РЕГРЕСІЙНИЙ МЕХАНІЗМ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ	35
2.1. Основні поняття теорії нечітких множин	35
2.2. Основні принципи діагностування параметрів режиму зрошення на базі нечіткої логіки	37
2.3. Моделювання функцій належності базами нечітких знань	42
2.3.1. Моделі функцій належності	42
2.3.2. Залежність типу «багато входів — вихід»	45
2.3.3. Лінгвістичність вхідних та вихідної змінних	47
2.3.4. Нечіткі бази знань	49

2.4. Ідентифікація нелінійних залежностей за системою нечітких логічних рівнянь	54
2.4.1. Узагальнена модель нечіткого логічного висновку	54
2.4.2. Система нечітких логічних рівнянь	55
2.4.3. Алгоритм нечіткого логічного висновку	57
2.5. Система нечіткого логічного висновку	60
2.6. Нечіткий регресійний механізм логічного висновку	62
Висновки за розділом 2	72
РОЗДІЛ 3. НЕЧІТКА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ЗРОШУВАНОВОГО ПОЛЯ	74
3.1. Фактори впливу на діагностику поливу та типи діагнозів	74
3.1.1. Вологозабезпеченість рослин	74
3.1.2. Кліматичний фактор	77
3.1.3. Рівень забезпеченості ґрунтовою вологою	78
3.1.4. Найменша вологоємність	80
3.1.5. Необхідність поливу	84
3.1.6. Діагноз поливів	85
3.2. Ієрархічна класифікація параметрів стану	86
3.3. Параметри стану зрошуваного поля як лінгвістичні змінні	89
3.3.1. Матриці знань щодо визначення необхідності поливу	91
3.3.2. Моделювання процесу прийняття рішень при визначенні строків та норм поливу на базі нечіткої логіки	101
3.4. Методика прийняття рішень при визначенні параметрів режимів зрошення за системою нечітких логічних рівнянь	110
3.5. Навчання нечіткої моделі діагностування зрошуваного поля	111
3.5.1. Генетичні алгоритми оптимізації	112
3.5.2. Основні операції генетичних алгоритмів	114
3.5.3. Кодування нечіткої моделі	114
3.5.4. Ініціалізація популяції	115
3.5.5. Оцінювання пристосованості хромосом	116

3.5.6. Селекція хромосом	116
3.5.7. Схрещування	118
3.5.8. Мутація	120
3.5.9. Генетичний алгоритм навчання нечіткої моделі діагностування поливів	121
3.6. Визначення адекватності прийняття рішень	125
3.7. Застосування нечіткого логічного висновку щодо необхідності поливу на прикладі поля томатів	127
3.8. Нечіткий регресійний механізм прийняття рішень при визначенні параметрів режимів зрошення	135
Висновки за розділом 3	137
РОЗДІЛ 4. СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ	139
4.1. Система нечіткого регресійного механізму логічного висновку	139
4.2. Принципи роботи системи підтримки прийняття рішень з визначення параметрів режимів зрошення	141
4.3. Порівняльний аналіз результатів досліджень	145
Висновки за розділом 4	147
ВИСНОВКИ	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	151
Додаток А. Навчальна вибірка	163
Додаток Б. Параметри функцій належності контрольованих змінних	188

ПЕРЕДМОВА

Зрошуване землеробство України в сучасних умовах знаходиться у важкому стані, існує нагальна потреба в перегляді існуючих підходів і розробленні нових інформаційних технологій щодо планування зрошення. Це зумовлено насамперед проблемами внутрішньогосподарського рівня, що виникли внаслідок розпаювання земель та створення нових форм організації приватного землекористування у межах колишніх господарств. Існуючі методи оперативного планування зрошення розроблялися на основі емпіричних моделей, які не в змозі повною мірою врахувати всі фактори, що впливають на прийняття правильного рішення стосовно вибору поливного режиму, та задовольнити потреби існуючих господарств. Діагностика поливу являє собою досить складний процес, і правильне визначення параметрів режимів зрошення залежить від великої кількості різноманітних факторів, а саме: прогнозування опадів, температура та вологість повітря, механічний склад, щільність, вологість ґрунту тощо. Досконалої методики, яка дозволяла б повною мірою комплексно охопити всі означені фактори при діагностуванні поливів, на сьогодні не існує. Складність розв'язання проблеми прийняття рішень багатократно зростає у випадках, коли вхідні параметри, які саме визначають стан системи, не можуть бути виміряні точно. При цьому на практиці у більшості випадків невизначеність стану не може бути описана з використанням теоретико-ймовірнісного підходу. Це відбувається внаслідок того, що параметри не є випадковими величинами і для них не існує можливості побудувати функції розподілення. Розглянуті обставини змушують шукати нові підходи, котрі дозволили б розв'язати завдання побудови багатовимірної залежності з нечітко заданими вхідними параметрами та нечисловою (лінгвістичною) інформацією.

Аналіз методів визначення причинно-наслідкових зав'язків між вхідними параметрами та вихідною величиною дозволяє дійти висновку, що жоден з них з притаманними їм перевагами і недоліками не може окремо повною мірою відповідати моделі «багатовимірний вхід – вихід». Отже, існує велика кількість неформалізованих задач, які не можуть бути розв'язані за

допомогою лише одного методу, а тому необхідний консорціум методологій, котрі забезпечили б основи конструювання та розвитку інтелектуальних систем. Першим шляхом комплексного використання таких напрямів, як нечітка логіка, нейро- і генетичні обчислення, та інших інтелектуальних технологій ідентифікації стали м'які обчислення (Soft Computing), які більшою мірою пристосовані до роботи з неточними та невизначеними даними, що дозволяє розв'язати проблему лінгвістичної невизначеності.

Однак наряду з подоланням труднощів використання нечітко заданої вхідної інформації необхідно також забезпечити можливість урахування відмінностей за важливістю контрольованих параметрів і врахувати їх взаємодії необхідного порядку. Ця проблема може бути вирішена методами нечіткої логіки та регресійного аналізу.

Таким чином, комбінація м'яких обчислень і теорії планування експерименту дає змогу формалізувати причинно-наслідкові зв'язки між змінними «вхід – вихід» та розв'язати актуальну науково-практичну задачу прийняття рішень щодо формування режимів зрошування за рахунок використання нечітких баз знань і рівняння регресії, що складає теоретичний напрям досліджень.

Метою дослідження є розроблення моделей і методів створення інтелектуальних інформаційних технологій обробки нечіткої вхідної інформації та підтримки прийняття рішень щодо формування режимів зрошування. Відповідно до сформульованої мети в роботі поставлені та розв'язані наступні задачі:

- аналіз основних методів моделювання процесів прийняття рішень і методів визначення строків та норм поливу, визначення можливостей застосування й обмежень цих методів;
- аналіз можливостей застосування теорії нечітких множин при моделюванні процесів прийняття рішень на основі нечіткого логічного висновку та розроблення регресійного механізму прийняття рішень;
- побудова ієрархічного дерева логічного висновку, визначення та формалізація часткових й узагальнених параметрів стану, що визначають необхідність у зрошенні, у вигляді лінгвістичних змінних;

- розробка математичної моделі й алгоритму діагностування параметрів режимів зрошення на основі нечіткого логічного висновку (структурна ідентифікація моделі);
- настроювання нечіткої моделі методами еволюційного програмування – генетичними алгоритмами (параметрична ідентифікація моделі діагностування);
- розроблення на основі нечіткої моделі логічного висновку інформаційної технології оцінювання ступеня доцільності вибору певного рішення стосовно визначення параметрів режимів зрошення із використанням розробленого регресійного механізму;
- розроблення системи підтримки прийняття рішень щодо формування режимів зрошення.

Об’єктом досліджень є процеси прийняття рішень за наявності нечіткої вхідної інформації при визначенні параметрів режимів зрошення.

Предметом досліджень є математичні моделі та методи для проектування системи підтримки прийняття рішень з оперативного планування режимів зрошення сільськогосподарських культур.

Методи досліджень базуються на комплексному використанні теорії ідентифікації для постановки завдання діагностики стану; теорії нечітких множин, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів, регресійного аналізу – для моделювання процесу прийняття рішень щодо формування режимів зрошення; комп’ютерного моделювання – з метою перевірки збіжності експериментальних та модельних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що розроблений метод оцінювання ступеня доцільності прийняття рішення на основі регресійного механізму логічного висновку за рахунок використання нечітких баз знань і рівняння регресії дозволяє формалізувати та автоматизувати процес прийняття рішень, ураховуючи велику кількість параметрів, які впливають на об’єкт, і попарний зв’язок між ними. При цьому досягнуто наступне.

1. Розроблено адекватну математичну модель процесу прийняття рішення і технологію оцінювання ступеня доцільності вибору рішення з

використанням апаратів нечіткої математики та регресійного аналізу, що дозволило розрахувати ступені доцільності використання певного рішення для будь-якого набору контрольованих параметрів.

2. Реалізовано можливість визначення синергетичного ефекту між нечітко заданими вхідними змінними, що дозволяє врахувати не тільки значення факторів, які впливають на прийняття рішення, але і їх взаємодії необхідного порядку.

3. Здійснено подальший розвиток технології оброблення нечітких вхідних змінних, що забезпечує можливість урахування відмінностей за їх важливістю.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі використання наукових положень роботи розроблена інтелектуальна інформаційна технологія для систем прийняття рішень в умовах невизначеності для оперативного планування режимів зрошення сільськогосподарських культур. Розроблену технологію реалізовано у вигляді комп'ютерної системи підтримки прийняття діагностичних рішень, яка забезпечує можливість розрахунку параметрів режимів зрошення без спеціальної підготовки.

Результати роботи впроваджено у процес визначення строків і норм поливу при зрошенні овочевих культур.

Автор висловлює глибоку подяку рецензентам: доктору технічних наук, професору Ковальчуку Павлу Івановичу; лауреату Державної премії України, члену Нью-Йоркської академії наук, доктору технічних наук, професору Любчику Леоніду Михайловичу; доктору технічних наук, професору Осадчому Сергію Івановичу, а також усім, хто сприяв оприлюдненню цієї наукової роботи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМИ ТЕХНІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ (НА ПРИКЛАДІ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ)

1.1. Аналіз сучасних концепцій моделювання процесів прийняття рішень

Для моделювання і проектування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень до недавнього часу використовувались математичні методи, засновані на байєсівському підході, теорії планування експерименту, розпізнаванні образів, логічному програмуванні, нечіткій логіці [84, 86].

Байєсівський підхід базується на припущенні, що задача вибору рішення сформульована в термінах теорії ймовірностей і при цьому відомі всі необхідні ймовірнісні величини.

Припустимо, що подія A може наступити за умови появи одного із несумісних подій H_1, H_2, \dots, H_n , що створюють повну групу, й існують апіорні ймовірності $P(H_i), i = \overline{1, n}$ відповідних подій, а також умовні ймовірності $P(A/H_i), i = \overline{1, n}$ появи події A за умови появи подій H_1, H_2, \dots, H_n . Припустимо, що в результаті експерименту подія A настала. Тоді апіорні ймовірності змінилися і набір апостеріорних імовірностей згідно з формулою Байєса

$$P(H_i / A) = \frac{P(A / H_i)P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(A / H_i)P(H_i)}.$$

Такий підхід може застосовуватись при визначенні ймовірності прийняття певного рішення $P(H_i), i = \overline{1, n}$, коли відомий вектор контрольованих параметрів $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$. Із розрахованих значень імовірностей кожного з класу рішень H_1, H_2, \dots, H_n обирається найбільше, що відповідає шуканому рішенню.

Недоліки такого підходу характеризуються тим, що апріорні оцінки ймовірностей прийняття певного рішення $P(H_i), i = \overline{1, n}$ не точні, а для розрахунку умовних ймовірностей $P(A/H_i), i = \overline{1, n}$ необхідна обробка великої кількості статистичної інформації. Та, головне, результат не може бути задовільно пояснений особі, що приймає рішення: пояснення ситуації, при якій приймається певне рішення тільки тому, що об'єкт має такі параметри, котрі на деякий (малий) відсоток зустрічається у подібних ситуаціях, не може задовольнити його. Також при внесенні в модель нової додаткової інформації потрібно перераховувати всі ймовірності.

Проблема неточності апріорних оцінок ймовірностей прийняття певного рішення $P(H_i), i = \overline{1, n}$ може бути описана функціями належності нечіткої апріорної ймовірності $\mu(P(H_i)), i = \overline{1, n}$ [79].

При застосуванні регресійного аналізу багатofакторна залежність $y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n)$, що пов'язує контрольовані параметри з результативною ознакою, може бути представлена лінійним рівнянням множинної регресії

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i + \dots + a_n \cdot x_n,$$

де a_0, a_1, \dots, a_n – невідомі коефіцієнти регресії.

При врахуванні парних взаємодій, які часто задовольняють певну модель, рівняння регресії є нелінійним за факторами:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i + \dots + a_n \cdot x_n + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + \dots + a_{i_1 i_2} x_{i_1} x_{i_2} + \dots + a_{n-1 n} x_{n-1} x_n = \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2} x_{i_1} x_{i_2}.$$

Невідомі коефіцієнти рівняння регресії знаходять методом найменших квадратів.

Головним недоліком такого моделювання є те, що в рівняннях розглянутого типу фактори, які впливають на результативну ознаку, є кількісними, що не можуть задовольнити за наявності лінгвістичної інформації.

Проблему врахування якісної інформації вирішують введенням у рівняння фіктивних змінних. Як фіктивні змінні використовують дихотомічні (бінарні) змінні, що приймають два значення – 0 і 1.

З введенням фіктивних змінних регресійна модель буде мати вигляд

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i + \dots + a_n \cdot x_n + \alpha_1 z_1.$$

Якщо якісна ознака, що розглядається, має k градацій, то в модель можна ввести дискретну змінну, яка приймає стільки ж значень. Зазвичай у модель вводять $k-1$ бінарних змінних.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i + \dots + a_n \cdot x_n + \alpha_1 z_1 + \dots + \alpha_{k-1} z_{k-1},$$

$$\text{де } z_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо ознака належить } i+1\text{-му рівню;} \\ 0 & \text{- в іншому випадку.} \end{cases}$$

При такому підході число бінарних змінних повинно бути на 1 менше, ніж число градацій якісної змінної.

Розв'язання в деякій мірі проблеми врахування кількісних змінних не враховує проблему наявності нечітко заданої інформації.

Існує класична мова, що спеціально створена для моделювання формальних людських міркувань, – це мова математичної логіки. Важливість логічного висновку стає очевидною вже при розгляді простих інформаційно-логічних процедур, що реалізовані мовою логічного програмування Пролог, одиницею якого є теорема логіки предикатів першого порядку [47].

Дедуктивний логічний висновок у Пролозі проводиться методом пошуку за зразком, тому для проведення висновку за правилом «якщо $x \in A$, тоді $y \in B$ » треба знайти в базі знань посилку правила « $x \in A$ ». У Пролозі не реалізована можливість логічного висновку за нечіткими правилами типу « x є трохи більшим за A », тому в цьому випадку необхідно зберігати в базі знань усю можливу інформацію про допустимі значення параметра x . Це приводить до надмірного збільшення витрат машинної пам'яті і часу на логічний висновок [84, 86].

Нечітка логіка формується на принципах здатності людини приймати правильні рішення за наявності неповної та нечіткої інформації, тому вона

здатна розв'язувати досить складні задачі, які неможливо представити засобами, що побудовані на кількісних співвідношеннях. Основою цього методу є нечіткий логічний висновок. Для проведення нечіткого логічного висновку використовують нечітку базу знань, що містить нечіткі висловлювання типу «ЯКЩО – ТОДІ» і функції належності для відповідних лінгвістичних термів.

При побудові продукційних правил необхідно дотримуватись наступних умов: для кожного лінгвістичного терму вихідної змінної існує хоча б одне правило; для будь-якого терму вхідної змінної є хоча б одне правило, в якому цей терм використовується як передумова (ліва частина правила).

Нечітка база знань спрощено подається у такому вигляді:

R1: ЯКЩО x_1 – це a_{11} ... І ... x_n – це a_{1n} , ТО y – це B_1 ;

...

Ri: ЯКЩО x_1 – це a_{i1} ... І ... x_n – це a_{in} , ТО y – це B_i ;

...

Rm: ЯКЩО x_1 – це a_{m1} ... І ... x_n – це a_{mn} , ТО y – це B_m ,

де x_k , $k = 1, \dots, n$ – вхідні змінні; y – вихідна змінна; a_{ik} – задані нечіткі множини з функціями належності.

За нечіткою базою знань будуються нечіткі логічні рівняння і результатом нечіткого висновку є нечітке значення змінної y^* .

При дискретному виході як рішення обирається те, функція належності якого є найбільшою. За умов неперервного виходу треба провести операцію перетворення нечіткої інформації в чітку форму.

Основними недоліками такого підходу є неможливість обліку відмінностей у важливості контрольованих вхідних змінних та врахування синергетичного ефекту при сумісній появі деяких конкретних значень окремих змінних.

1.2. Діагностування як метод підтримки оптимального водного режиму

Однією з найважливіших умов підвищення врожайності сільськогосподарських культур й ефективного використання зрошувальної води є впровадження у виробництво науково обґрунтованих режимів зрошення. Негативний вплив на врожай роблять як недостатні, так і надлишкові поливи, причому в обох випадках втрати врожаю можуть бути значними. Запізнювання з поливами веде до зниження кількості доступної вологи в ґрунті, що у свою чергу викликає вповільнення темпів росту, скидання частини листів, квіток і плодів, запал зерна, дрібноплідність, збільшення відсотка нетоварної продукції. Зниження вологості в активному шарі ґрунту до вологості в'янення приводить до необоротних руйнівних процесів у рослинній клітині. Надлишкові поливи спричиняють піднімання ґрунтових вод, погіршення меліоративного стану земель, появу ерозії на схилах, вимивання добрив у глибоких шарах ґрунту. Крім того, перезволоження діє негативно й на саму рослину: погіршується дихання коріння, припиняється доставка живильних речовин у надземні органи, уповільнюються корисні мікробіологічні процеси в ґрунті, розвиваються грибкові захворювання, знижується стійкість рослин до несприятливих умов.

Таким чином, підтримка оптимального водного режиму в активному шарі ґрунту – найважливіша умова одержання високих урожаїв і збереження задовільного меліоративного стану зрошуваних земель. Особливу важливість у зв'язку із цим здобувають оптимальні строки й норми поливу культур залежно від зони оброблення. Своєчасне забезпечення одного поливу принесе більше користі щодо збільшення врожаю, аніж два невчасних.

Важливою умовою підтримки оптимального поливного режиму, збереження меліоративного стану земель, підвищення продуктивності дощувальної техніки є правильне визначення строків поливу й поливної норми з урахуванням типу ґрунтів, культури й поливного режиму, що рекомендується.

1.3. Методи визначення строків і норм поливів

Розглянемо існуючі методи визначення параметрів режимів зрошення та проведемо їх аналіз з метою розроблення нового методу з використанням апарату нечіткої математики, який дає можливість урахувувати велике число параметрів стану, що впливають на більш точне визначення строків та норм поливів, узагальнюючи раніше накопичений досвід.

Відомі до теперішнього часу способи визначення строків поливу сільськогосподарських культур можна об'єднати у п'ять основних груп: а) за схемами (графіками) поливів, установлених за періодами (фазами) вегетації в певних ґрунтово-кліматичних умовах; б) біокліматичні з розрахунку сумарної витрати вологи зрошуваним полем протягом вегетаційного періоду; в) за вологістю ґрунту в кореневмісному (розрахунковому) шарі; г) за морфологічними (зовнішніми) ознаками, що змінюються залежно від вологозабезпеченості рослин; д) за фізіологічними показниками [100].

Призначення поливів за фазами або періодами розвитку рослин зводиться до заздалегідь наміченої схеми поливу, які призначаються до середніх дат настання відповідних фаз. Однак завчасно намічені календарні строки поливу не точні й змінюються при випаданні природних опадів. Не враховується при цьому й дійсна вологозабезпеченість рослин.

В основу біокліматичного методу покладені розрахункові дані сумарної витрати вологи зрошуваним полем за певний період вегетації. Черговий полив призначається в момент зниження вмісту вологи до певного рівня, що відповідає критичній вологості ґрунту. При цьому враховуються ефективні опади, що випадають у розглянутий період часу.

Сумарна витрата вологи розраховується: а) за сумою середньодобових дефіцитів вологості повітря й кривими середньодобового водоспоживання; б) за сумою середньодобових температур і відносної вологості повітря; за даними випаровуваності за певний період часу [100].

Розглянуті підходи враховують лише ґрунтові та кліматичні характеристики, не звертаючи увагу на стан рослини. Сумарна витрата вологи

визначається досить неточно, бо немає ні теоретичних, ні емпіричних залежностей, які б могли повною мірою визначати зв'язок між витратою вологи зрошувальним полем та факторами навколишнього середовища. Відсутність багатofакторної залежності між параметрами стану зрошуваного поля і вихідною змінною – діагнозом поливу приводить до неточних розрахунків параметрів режимів зрошення, що супроводжується значними витратами водних і пов'язаних з цим енергетичних ресурсів.

Методом призначення поливів за морфологічними ознаками користуються, як правило, практики зрошуваного землеробства. Він зводиться до того, що візуально за малопомітними змінами у забарвленні листів, їхнім зів'яненням, за ослабленням тургору в зростаючих частинах рослин визначають момент, коли необхідно почати полив. Основними критеріями для призначення строків поливу являються втрата тургору листя у найбільш спекотний час дня й переміщення вузла цвітіння до точки росту. Також надійним показником вважається середньодобовий ріст стебла за основними періодами росту.

У різний час дослідники пропонували наступні фізіологічні показники: обводнення листів, осмотичний тиск клітинного соку, ступінь відкритості устячок, транспірація листів, температурний градієнт «лист – повітря», концентрація клітинного соку листів, сисна сила листів, виділення пасоки з пенька зрізаної рослини, величина електричного опору тканин [100]. Ще К.А. Тімірязєв указував, що тільки сама рослина може дати найбільш правильну й точну відповідь про водозабезпеченість при тій або іншій вологості ґрунту. Тому, знаючи, як протікає той або інший фізіологічний процес, можна судити про водозабезпеченість рослин, а отже, й призначати черговий полив.

З перерахованих показників кожний має свої переваги та недоліки й може бути використаний для розв'язання питань при науковій розробці й практичному здійсненні оптимального поливного режиму. При визначенні строку поливу за фізіологічними показниками найбільш надійним вважається

концентрація клітинного соку листів і сисна сила листів. Концентрацію клітинного соку визначають за допомогою рефрактометра.

Найбільшого поширення одержав спосіб призначення строку й норм поливу за вологістю ґрунту. Вологість ґрунту є найбільш надійним показником для визначення строків і норм поливу. Істотною перевагою його є те, що вираження вологості щодо граничної польової вологоємності характеризує доступність ґрунтової вологи для рослин і робить цей показник універсальним для різних типів ґрунтів. Існує багато методів визначення вологості ґрунту, які мають різну технологію, певні обмеження та труднощі застосування.

При використанні цього способу діагностування поливів не приділяється належної уваги стану рослини і її потребам у воді, не враховується доступність ґрунтової вологи для рослин, розподіл зон інтенсивного висушення ґрунту кореневою системою. Тому середня вологість активного шару ґрунту не завжди відбиває потреби рослин у воді. При такому способі розрахунку поливних норм враховується вплив на водний режим рослин тільки одного фактору, що регулюється за допомогою поливів та істотно змінюється, – вологості ґрунту. А тому немає можливості комплексно представити процес прийняття рішень щодо вибору строків і норм поливів без проведення розрахунків, що вимагає спеціальної підготовки в області зрошувального землеробства.

Аналіз розглянутих методів показав, що жоден з них не може повною мірою визначити справжні потреби рослин у воді, бо на сьогоднішній час не існує ні теоретичних, ні емпіричних залежностей, які б могли врахувати всю числову і лінгвістичну інформацію, що впливає на більш точне визначення строків та норм поливу.

1.4. Аналіз методів визначення ґрунтової вологи

Найбільш розповсюдженими методами діагностування строків та норм поливу є методи, що засновані на визначенні вологості ґрунту. Хоча цей

показник не є визначальним у виборі правильного рішення щодо необхідності поливу, але більшою мірою, ніж деякі інші визначає потребу рослин у воді. Вимірювання вологості ґрунту являє собою багатофункціональний процес, і від точності визначення залежить правильність вибору діагностичного рішення.

Підходи, що пов'язані з вимірюванням вологості ґрунту, можна поділити на три принципово різні групи.

У першій з них вилучається зразок із шару ґрунту, вологість в якому необхідно визначити, і проводять вимірювання традиційним термостатно-ваговим методом. Це єдиний прямий інструментальний метод вимірювання вологості ґрунту.

Друга група заснована на таких непрямих методах вимірювання вологості ґрунту, як електромагнітні й ядерні методи. Цей підхід реалізується встановленням в різних шарах ґрунту спеціальних давачів різної дії і дозволяє виміряти вологість в точці на будь-який момент часу.

Третя група заснована на дистанційних методах, які ґрунтуються на вимірюванні випромінювання та відбивання електромагнітної енергії поверхнею ґрунту.

Існують також підходи для розрахунків вологозапасів, що використовують такі метеорологічні дані, як температура, вологість або дефіцит вологості повітря, опади та вологість ґрунту за попередній період.

Термостатно-ваговий (буровий, або ваговий) метод є найбільш розповсюдженим способом визначення вологості ґрунту і вважається еталонним. Він використовується в дуже широкому діапазоні вологості ґрунту [99]. Виключенням є величини, значення яких близькі до повної вологоємності. Помилкові результати при цьому з'являються внаслідок вижимання буром вологи із зразків ґрунту. Вміст вологи у зразках ґрунту, взятих за допомогою бура, визначається після їх висушування до постійної ваги: після зважування визначають кількість вологи, що втрачена при сушці, а за нею – вологість ґрунту у відсотках до сухої маси. Зразки ґрунту

відбираються з певною повторюваністю кожен раз в іншій точці для забезпечення мінімальної похибки вимірювань вологозапасів.

Серед недоліків цього методу можна виділити наступні: на враховується фізіологічна потреба рослин у воді, існує велика мінливість вологозапасів навіть у межах невеликої дослідної ділянки та виникають проблеми із застосуванням цього методу на засолених ґрунтах і на ділянках з неглибоким заляганням ґрунтових вод [59, 67].

Електричні методи ґрунтуються на визначенні електропровідності ґрунту та на вимірюванні зміни електроємності конденсатора, що залежить від ступеня зволоження ґрунту.

Вимірювання електричного опору проводять безпосередньо між електродами, які встановлюють у ґрунт, або шляхом розміщення в ньому шпаруватого тіла. За показниками мікроамперметра по проградуєваній кривій знаходять вологість ґрунту, що відповідає значенням приладу. Головним недоліком цього методу є те, що відсутня пряма залежність електроопору та вологості ґрунту, бо на значення електроопору впливає не тільки вологість, але й концентрація і тип розчинених іонів у ґрунтовому водному розчині.

Принцип дії ємнісних вологомірів ґрунтується на вимірюванні зміни ємності конденсатора, між пластинками якого розміщується ґрунт. Ємність такого приладу на пряму залежить від вологості ґрунту. Вимірювання проводять шляхом уведення давача, який має вигляд виделки, у ґрунт. Давач сполучений з вимірювальним приладом, що визначає вологість шляхом установлення зв'язку між ємністю давача і вологістю ґрунту, яку отримують термостатно-ваговим методом. При зростанні електричного опору у давачі понад 1000 Ом такі прилади стають більш чутливими до зміни вмісту вологи, тому при збільшенні величини електроопору ґрунту стає ширший інтервал вологості, який може бути виміряним ємнісним вологоміром.

Радіоактивні методи вимірювання вологості ґрунту об'єднують такі методи, як нейтронний і метод гамма-променів.

Ідея нейтронного методу полягає у випромінюванні радіоактивним джерелом швидких нейтронів, які уповільнюються молекулами води ґрунту і стають тепловими (повільними) при досягненні енергії теплової рівноваги з цими молекулами. При цьому щільність хмари повільних нейтронів буде пропорційна вологості середовища: при зменшенні вологості ґрунту хмара теплових нейтронів стає менш щільна і розповсюджується далі від джерела, у вологому ґрунті щільність хмари зростає.

Нейтронні методи, як і електричні, базуються на даних термостатно-вагового методу, тому розподіл вологості ґрунту при цьому досить близький до термостатного майже по всій глибині вимірювання, крім верхніх шарів ґрунту, де він дає занижені результати [108].

Одним з недоліків нейтронного методу є зниження точності вимірювань, що відбувається внаслідок наявності у ґрунті водневих атомів у сполуках з органікою та мінералами.

В основу гаммаметричного методу покладена ідея поглинання гамма-променів при проходженні їх крізь ґрунт. Уважається, що у сухому ґрунті величина поглинання гамма-променів є сталою, тому будь-яка зміна вологості приведе до змін у ступені поглинання гамма-променів вологим ґрунтом. Цей метод може бути взятий за основу автоматичного пристрою, бо дає можливість безперервно контролювати вологість у деякому шарі ґрунту і визначати вологість у верхніх шарах ґрунту.

Спільними недоліками електричних і радіоактивних методів є прив'язка їх до термостатно-вагового методу вимірювання вологості при таруванні приладів, що додає до похибок вимірювання показників ще похибки термостатно-вагового методу і похибки тарування. До того ж розташування електричних і радіометричних давачів на полях не дозволяє використовувати деякі агротехнічні засоби. Тому ці методи не змогли отримати широкого застосування.

До дистанційних (безконтактних) методів відносяться методи вимірювання пасивного радіотеплового випромінювання Землі за допомогою

радіометрів, що працюють у тих же частотних діапазонах, що і радари – 2...30 см, методи вимірювання активного випромінювання в межах ультракоротких хвиль та метод визначення природного гамма-поля Землі.

За значеннями інтенсивності радіотеплового випромінювання робиться висновок про ступінь зволоження ґрунту: чим нижче випромінювальна здатність ґрунту, тим вище його вологість. Радіотеплове випромінювання ділянок ґрунтів вимірюють розташовуючи радіометри СВЧ-діапазона на супутниках і літаках. Аналізуючи це випромінювання, визначають вологість ґрунту.

Активні методи випромінювання засновані на вивченні розсіяного поля радіохвиль, що випромінюються спеціальним радіопередавачем.

Перші два методи дозволяють вимірювати вологість у верхньому 30-сантиметровому шарі ґрунту.

При літаковій гамма-зіомці проводиться вимірювання зміни природного гамма-поля Землі, що пов'язана зі зміною вологості ґрунту. Основна частка потоку гамма-випромінювання, що складає близько 95%, створюється поверхневим шаром ґрунту глибиною 20 – 30 см.

Основні переваги радіодіапазону полягають у тому, що хвилі у цьому діапазоні досить слабо поглинаються і майже не розсіюються хмарами. Тому радіометоди на відміну від інфрачервоних застосовуються при будь-якій погоді. Це має особливе значення при зондуванні Землі із супутників, оскільки принаймні половина земної кулі завжди покрита хмарами.

Інша перевага радіометодів пов'язана з більшою, порівняно з оптичними хвилями, прониклою здатністю радіохвиль. Завдяки цьому в радіопроміннях удається спостерігати поверхню Землі без екрануючого ефекту рослинності. Крім того, з'являється можливість вивчати шари підґрунтя до певної глибини, використовуючи СВЧ-діапазон радіохвиль.

Слід зазначити, що дистанційні методи дають можливість визначити вологість ґрунту, яка виражена в процентах від маси абсолютно сухого ґрунту, що створює певні труднощі при переході до стандартних одиниць

вимірювання, тому похибка при сантиметрових довжинах хвиль складає до 40%.

До розрахункових методів відносять емпіричні та теоретичні [99, 108]. Емпіричні методи використовуються при визначенні вологи у кореневмісному шарі ґрунту, що залежить від кліматичних умов, кількості теплової енергії, що потрапляє на поверхню, початкової вологості ґрунту. У теоретичних способах розглядаються закони пересування вологи в ґрунті згідно з основним законом перенесення маси й енергії.

Рівняння водного балансу складається для кожної ланки зрошувальної системи на певний період часу. За різних умов деякі елементи водного балансу можна виключити із рівняння, якщо їх величини майже не впливають на розрахунки, тому воно може бути значно спрощеним.

Рівняння водного балансу поля в деякій i -й період часу має вигляд

$$W_i = W_{i-1} + P_i + m_i - Y_i - Z_i - E_i + W_i^{(e)},$$

де W_i , W_{i-1} – запаси вологи на кінець та відповідно початок розрахункового періоду, мм; P_i – надходження опадів у ґрунт, мм; m_i – поливна норма нетто, мм; Y_i – поверхневий скид води, мм; Z_i – фільтраційний відтік вологи, мм; E_i – сумарне випаровування; $W_i^{(e)}$ – підживлення активного шару ґрунтовими водами, мм.

Поливна норма визначається наступним чином:

$$m_{max} = 100 \cdot j \cdot H \cdot (\beta_{нв} - \beta_{кр}),$$

де j – щільність ґрунту, т/м³; H – розрахунковий, активний шар ґрунту, м; $\beta_{нв}$ – вологість при найменшій вологоємності (НВ) у розрахунковому шарі, % від ваги сухого ґрунту; $\beta_{кр}$ – передполивний поріг зволоження активного шару ґрунту, % від ваги сухого ґрунту.

Для проведення розрахунків за рівнянням водного балансу необхідно мати дані про початкові запаси вологи в активному шарі ґрунту. Такі вологозапаси визначаються одним із наведених інструментальних методів, але перевага віддається термостатно-ваговому методу як еталонному. Кінцеві вологозапаси для заданого періоду стають при цьому початковими для

наступного. Розрахунки можна розпочинати також з дати випадання рясних опадів або проведення поливу, приймаючи $W_{i-1} = m_i$.

Сума опадів визначається застосуванням дощомірів, а кількість ефективних опадів визначається коефіцієнтами використання опадів.

Втрата води на фільтрацію та поверхневий стік мають місце лише при надлишковому водонадходженні, тому ці елементи часто дорівнюють нулю.

При визначенні підживлення активного шару ґрунтовими водами використовують зазвичай коефіцієнт підживлення або дані за середніми величинами підживлення.

Основним елементом розрахунку режиму зрошення є визначення сумарного випаровування. Для його розрахунку використовуються різні методи, розроблені А.М. і С.М. Алпатьєвими, С.І. Харченком, Д.А. Штойком, А.Р. Константиновим та ін.

За А.М. Алпатьєвим сумарне випаровування дорівнює

$$E_i = \sum d K_{\delta l} K_k,$$

де $\sum d$ – сума дефіцитів вологості повітря, мм; $K_{\delta l}$ – біологічний коефіцієнт; K_k – мікрокліматичний коефіцієнт.

За біофізичним методом Д.А. Штойка, що отримав найбільшого розповсюдження в степовій зоні України, E_i розраховується за наступними формулами: від сходів чи посадки до затінення поверхні рослинами і в період відмирання листового апарату

$$E_1 = \sum_{i=1}^n t_c^i (0,1t_c^i - \frac{a}{100}),$$

а в інший час вегетації

$$E_2 = \sum_{i=1}^n t_c^i (0,1t_c^i + 1 - \frac{a}{100}),$$

де $\sum_{i=1}^n t_c^i$ – сума середньодобових температур повітря за n діб, °С; t_c^i –

середньодобова за період температура повітря, °С; a – середньодобова відносна вологість повітря, %.

Метод теплового балансу заснований на використанні рівняння теплового балансу з обліком тепло- і вологообміну в приземному шарі повітря

$$R=LE+B+P,$$

де R – радіаційний баланс; LE – витрати тепла на випаровування (L – прихована теплота випаровування; E – випаровування); B – кількість тепла, що йде на нагрівання ґрунту; P – турбулентний потік тепла.

Одним із підходів, що пов'язує вологозапаси у ґрунті з метеорологічними факторами у період вегетації, є метод, запропонований С.О. Веріго та Л.О. Разумовою, який заснований на використанні рівняння

$$\Delta W = a \cdot T_{cp} + b \cdot h + c \cdot W + l,$$

де T_{cp} – середньодекадна температура повітря °С; h – сума декадних опадів, мм; W – запаси вологи у ґрунті на початку декади, мм; a, b, c, l – числові параметри.

Основним недоліком методу є наявність у рівнянні складової W , що потребує додаткових вимірювань, та непристосованість методу до різних ґрунтово-кліматичних умов.

Теоретичні способи ґрунтуються на законах масопереносу в ґрунтах, що представлені у вигляді одного або системи диференціальних рівнянь. Результатом узагальнення накопиченого матеріалу стали підходи, засновані на термодинамічному методі, теорії ізотермічного руху нестискуваної рідини у твердому середовищі.

Недоліком теоретичних методів є недостатньо розроблений інструментарій, що дозволяє описати конкретне одиничне досліджуване явище чи процес. До того ж диференціальні рівняння, зважаючи на їх складність, доводиться зазвичай розв'язувати чисельними методами із застосуванням обчислювальної техніки.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що кожний із розглянутих методів визначення ґрунтової вологи має певні недоліки, серед яких найбільш суттєвими є: обмеження у використанні формул для різних кліматичних зон, помилки та похибки вимірювань, у деяких методах –

складність вимірювань, велика мінливість показника вологості в межах поля та, головне, – неможливість комплексного охоплення всіх показників, що впливають на визначення вологозабезпеченості рослин.

1.5. Аналіз існуючих режимів зрошення

Рівень забезпеченості вологою є одним із основних факторів життєдіяльності рослин, і порушення водного балансу призводить до небажаних змін у фізіологічних та біохімічних процесах їх тканин. При недостатній кількості вологи в ґрунті ці процеси уповільнюються, що стає причиною зниження врожайності та втрати товарного вигляду і смакових якостей рослин. Отже, підтримка вологозабезпеченості рослин на рівні вище за критичний дає змогу отримувати гарантовані врожаї із збереженням товарності продукції. Потреба рослин у воді при цьому задовольняється шляхом проведення поливів певними нормами у певні строки. Таким чином, створення оптимального водного режиму досягається ефективністю оперативного планування зрошення.

Під режимом зрошення мається на увазі розподілення поливів у часі з певними поливними нормами [21]. Залежно від потреб та можливостей господарств виникає необхідність у застосуванні різних поливних режимів, параметри яких у свою чергу залежать від ґрунтово-кліматичних умов, біологічних особливостей рослин та способів поливу. Вибір режиму зрошення у кожному окремому випадку необхідно здійснювати відповідно до конкретних умов. Необхідність визначення режиму зрошення зумовлена також проблемами, що виникають у господарствах у зв'язку із низьким рівнем ресурсозабезпеченості та незадовільним ґрунтово-екологічним станом зрошуваних земель. Отже, вибір режиму зрошення повинен бути орієнтований не тільки на отримання максимальних врожаїв, а також відповідати потребам господарств.

При оперативному плануванні поливів у сучасних умовах ведення зрошуваного землеробства використовуються наступні типи режимів

зрошення: біологічно оптимальний, оптимально екологічно безпечний, водозберігаючий, ґрунтозахисний.

1.5.1. Біологічно оптимальний режим зрошення

Біологічно оптимальний режим зрошення сільськогосподарських культур застосовується для підтримання оптимального рівня водозабезпеченості рослин у всіх фазах вегетації з метою отримання максимальних врожаїв. Такий режим зрошення направлений на постійне регулювання вологості ґрунту в активному шарі у межах передполивної – найменшої вологості, що відповідає оптимальній вологості росту і розвитку рослин [59, 60]. Поповнення дефіциту вологи відбувається шляхом проведення поливів для забезпечення вологості ґрунту на рівні 90 – 95% НВ.

При цьому підході запаси вологи для розрахункового шару ґрунту визначають за рівнянням водного балансу поля наступним чином:

$$W_{\tau, i} = W_{\tau-1, i} + m_i + (P_i - \Delta P_i) + W_i^{(2)} - E_i,$$

де $W_{\tau, i}$, $W_{\tau-1, i}$ – запаси вологи на кінець та відповідно початок розрахункового періоду, мм; m_i – поливна норма, мм; P_i , ΔP_i – обсяги опадів, що надійшли у ґрунт та витрачені на стік, мм; $W_i^{(2)}$ – підживлення розрахункового шару ґрунту у разі близького залягання ґрунтових вод, мм; E_i – сумарне випаровування з розрахункового шару за період розрахунку, м³/га.

Розрахунок строків та норм поливів за таким водно-балансовим методом дозволяє отримувати високі врожаї шляхом задоволення біологічних потреб рослин у воді на максимальному рівні.

Біологічно оптимальний режим зрошення тривалий час застосовувався на практиці при оперативному плануванні поливів в умовах безперебійної подачі води, але перехід до платного водокористування та погіршення ґрунтово-екологічного стану зрошуваних земель змусили відмовитися багатьох господарств від широкого застосування такого підходу та перейти до

планування зрошення за умов більш ефективного використання водних, енергетичних та земельних ресурсів.

1.5.2. Оптимально екологічно безпечний режим зрошення

Оптимально екологічно безпечний режим зрошення, як і біологічно оптимальний, забезпечує підтримання водоспоживання сільськогосподарських культур на потенційно можливому для конкретних погодних умов рівні протягом усього періоду вегетації як основи для отримання максимального врожаю за умови зрошення, але якщо виключити втрати поливної води на інфільтрацію за межі кореневмісного шару ґрунту [19, 51, 81].

При плануванні оптимально екологічно безпечних режимів зрошення запаси вологи для розрахункового шару ґрунту визначають за наступним рівнянням водного балансу поля:

$$W_i = W_{i-1} + m_i + (P_i - \Delta P_i) + W_i^{(2)} - K_1 \cdot K_2 \cdot E_i,$$

де W_i – вологозапаси наприкінці розрахункового періоду, мм; W_{i-1} – вологозапаси на початку розрахункового періоду, мм; m_i – технологічно обґрунтована екологічно безпечна поливна норма, мм; $P_i, \Delta P_i$ – обсяги опадів, що надійшли у ґрунт та витрачені на стік, мм; $W_i^{(2)}$ – надходження вологи в активний шар ґрунту з ґрунтових вод при глибині їх залягання менше 3,5 м; E_i – сумарне випаровування сільськогосподарських культур, мм; K_1 – коефіцієнт приведення нормативних біологічних коефіцієнтів відповідно до водного балансу в активному шарі ґрунту; K_2 – коефіцієнт урахування обсягів вологи, яка використовується сільськогосподарськими культурами на транспірацію з шарів ґрунту, що залягають нижче активного.

Оптимально екологічно безпечний режим зрошення також орієнтований на достатній рівень ресурсозабезпеченості, але порівняно із біологічно оптимальним режимом є кращим відносно інфільтраційних втрат води за рахунок зменшення поливних норм.

1.5.3. Водозберігаючий режим зрошення

Водозберігаючий режим зрошення – це такий режим, що необхідний для підтримки оптимального водоспоживання рослин за умов дефіциту водних та енергетичних ресурсів. При низькому рівні ресурсозабезпеченості виникає необхідність при зниженні врожаю сільськогосподарських культур отримувати прибуток за рахунок зменшення поливних норм та витрат на проведення додаткових поливів.

Реалізація водозберігаючих режимів зрошення досягається шляхом зниження вологості ґрунту нижче за критичну у некритичних фазах розвитку рослин, проведення поливів меншими поливними нормами залежно від розвитку кореневої системи відповідно до фаз розвитку рослин, зменшення передполивного порогу вологості ґрунту порівняно з біологічно оптимальним та оптимальним екологічно безпечним режимом зрошення. Таким чином, досягається можливість підтримання сприятливих для розвитку рослин умов тільки у найбільш чутливих до дефіциту вологи фази розвитку.

При водозберігаючих режимах зрошення поливи призначають для різних за механічним складом ґрунтів відповідно до таких значень передполивної вологості: 70 – 80% НВ – для важко-суглинкових ґрунтів; 65 – 70% НВ – для середньосуглинкових і 60 – 65% НВ – для легкосуглинкових. Для іншого, жорстокого, типу водозберігаючого режиму зрошення передбачається зменшення передполивної вологості ґрунту ще на 10% НВ.

Водозберігаючі режими зрошення передбачають зменшення поливної норми до 200 – 450 м³/га.

Отже, за таких умов проведення водозберігаючих режимів зрошення виникає можливість економії водних та пов'язаних із ними енергетичних ресурсів при мінімальній втраті врожаю.

1.5.4. Ґрунтозахисний режим зрошення

Ґрунтозахисний режим зрошення був розроблений для призупинення деградаційних процесів у ґрунті, що виникли внаслідок нераціонального

проведення зрошення, та для відновлення його родючості. Інтенсифікація зрошення призвела до погіршення ґрунтово-екологічного стану зрошуваних земель, що пов'язано з підняттям рівня ґрунтових вод, зміною їх мінералізації, засоленням зрошуваних ґрунтів, зменшенням їх бонітету, погіршенням поживного режиму.

Для відновлення та збереження родючості ґрунтів необхідний комплекс заходів для забезпечення задовільного еколого-меліоративного стану зрошуваних земель. Застосування ґрунтозахисного режиму спрямоване не на отримання прибутку від такого режиму зрошення, а на відновлення родючості ґрунту, при цьому поливи проводять тільки у критичних фазах розвитку рослин та малими поливними нормами. Додаткових витрат за таких умов потребують проведення агротехнічних заходів та забезпечення ґрунту поживними речовинами.

1.6. Інформаційно-обчислювальні системи оперативного планування зрошення

Перша інформаційно-обчислювальна система планування зрошення була розроблена у 70-ті роки 20-го сторіччя фахівцями лабораторії режимів зрошення Українського інституту гідротехніки і меліорації (ІГіМ УААН) та Інституту ґрунтової родючості м. Мюнхеберг. У результаті співробітництва була створена автоматизована система під назвою інформаційно-дорадча система оперативного планування зрошення (ІДС ОПЗ), яка виконувала такий комплекс задач [19]: оперативне прогнозування динаміки запасів вологи в ґрунті кожної поливної ділянки зрошувальної сівозміни; визначення біологічно оптимальних строків та норм поливів на полях та поливних ділянках; побудова укомплектованих планів-графіків поливів на сукупностях полів; оптимізація планів-графіків при дефіциті ресурсів; підготовка інформаційних звітів про хід виконання поливів.

Завдяки впровадженню ІДС ОПЗ по всій території колишнього СРСР збільшилась ефективність планування зрошення в результаті раціонального

використання водних ресурсів, з'явилась можливість урахування більшої кількості факторів, що впливають на визначення поливного режиму. Площа використання ІДС ОПЗ досягла 4 млн га.

З розвитком обчислювальної техніки виникла необхідність розробки нової інформаційної системи, і в 1989 р. ІДС ОПЗ була замінена на інформаційно-обчислювальну систему (ІОС) «Полив», яка на відміну від першої могла працювати і децентралізовано. ІОС «Полив» виконувала такий же комплекс задач, що і ІДС ОПЗ, але вже була орієнтована на використання автоматизованого робочого місця у господарстві або управлінні зрошувальних систем (УЗС). Це була перша в галузі система планування поливів на ПЕОМ [19].

На основі досліджень, пов'язаних з розробкою оптимально екологічно безпечних та водозберігаючих методів планування зрошення на початку 90-х рр. ХХ сторіччя було вдосконалено ІОС «Полив» і на її базі створено нову ІОС «Полив-2», що мала певні зміни та доповнення: випаровування вимірялось за удосконаленим методом, були обмежені обсяги поливних норм та розрахункових шарів ґрунту, скориговано інформаційно-довідкову інформацію.

У 1998 році в ІГіМ УААН була розроблена модифікована версія інформаційно-обчислювальної системи «Полив-2У», у якій об'єднуються рекомендації з призначення строків і норм поливу на кожному полі господарства з непрямым водообліком за фактичним часом роботи дощувальної техніки та аналізом використання водних, енергетичних ресурсів і добрив [19].

1.7. Класифікація сучасних методів планування зрошення

Узагальнюючи всі розглянуті методи з визначення строків і норм поливу, а також пов'язані з ними режими зрошення, проведемо класифікацію щодо планування зрошення.

Ця класифікація побудована на основі застосування різних підходів до планування зрошення.

1. Нормативні методи ґрунтуються на використанні загальних нормативних параметрів існуючих поливних режимів, які визначені в результаті багаторічного дослідження при проведенні експериментів за різних ґрунтово-кліматичних умов.

Нормуванню підлягають такі параметри водозберігаючих, біологічно оптимальних, оптимально екологічно безпечних та ґрунтозберігаючих режимів, як норма поливу, значення передполивної вологості, значення активного шару для різних типів ґрунту і фаз розвитку рослин.

2. Діагностичні методи засновані на визначенні строків та норм поливів за вологістю ґрунту: термостатно-ваговий, нейтронний, електричний, радіоактивний метод, методи дистанційного визначення вологи і за морфологічними та фізіологічними показниками.

3. До розрахункових методів відносяться водобалансові, теплобалансові методи, які складаються з різних теоретичних та емпіричних моделей визначення випаровування й інших елементів водного балансу, та різні методи вологопереносу і масопереносу.

4. Інформаційно-розрахункові методи реалізовані в інформаційно-обчислювальних системах і ґрунтуються на розробках усіх розглянутих методів планування зрошення. До цієї групи, крім розглянутих систем оперативного планування поливів ІОС «Полив», ІОС «Полив-2», ІОС «Полив-2У», відносять і системи довгострокового планування, такі як ІОС «Проект» та ІОС «Водопотреба».

1.8. Формулювання наукової проблеми та постановка задач дослідження

На сьогодні спостерігається тенденція збільшення складності математичних і формальних моделей реальних систем та процесів управління. Це пов'язано з необхідністю підвищення адекватності цих моделей і

врахування якомога більшої кількості факторів, які впливають на процеси прийняття рішень. Традиційні методи побудови моделей не приводять до задовільних результатів у тому випадку, коли описання проблеми, що підлягає вирішенню, із самого початку є неточним і неповним. Прагнення отримати всю вичерпну інформацію для побудови точної математичної моделі будь-якої складної реальної ситуації може призвести лише до втрати часу та коштів, оскільки це може бути взагалі неможливо.

Донедавна при проектуванні і дослідженні систем автоматизованого управління й систем інтелектуальної підтримки процесів підготовки і прийняття рішень використовувалися два великі класи математичних моделей і методів: один з них представлений детермінованими, а другий імовірними моделями. Сьогодні спостерігається бурхливий розвиток і застосування в різних областях третього, абсолютно нового класу моделей і методів, заснованого на принципах теорії нечітких множин.

Також сформувався такий новий напрям, як м'які обчислення, за допомогою котрих стало можливим оптимізувати нечіткі моделі. Використання методів оптимізації дозволило будувати адекватні моделі процесів і систем навіть при достатньо грубій початковій нечіткій моделі.

Однак у системах, заснованих на нечіткому підході, особливо при великій кількості змінних, практично неможливо врахувати синергізм, що може виникати при сумісній появі деяких конкретних значень окремих змінних, та забезпечити облік відмінностей у важливих факторах, котрі впливають на прийняття рішення.

Ці обставини роблять доцільною розробку технології, яка більшою мірою відповідала б моделі «багатовимірний вхід – вихід» і дала можливість урахувати не тільки значення факторів, що впливають на вихідну змінну, але й визначати ступінь важливості контрольованих параметрів при прийнятті рішення і їх взаємодії у необхідному порядку.

Аналіз розглянутих підходів, що використовуються при оперативному плануванні зрощення, робить актуальним розробку нової інформаційної

технології прийняття рішень щодо визначення строків та норм поливу. Це обумовлено великою кількістю параметрів, які визначають необхідність у зрошенні та мають у більшості випадків нечіткий характер. У результаті проведеного аналізу сучасних підходів, пов'язаних з проблемою прийняття рішень і визначення строків та норм поливу, можна сформулювати такі задачі досліджень:

1. Провести аналіз основних методів прийняття рішень і методів оперативного планування зрошення, визначити можливості та обмеження їх застосування.

2. Розглянути методологічні аспекти застосування теорії нечітких множин при моделюванні процесів прийняття рішень на основі нечіткого логічного висновку та розробити регресійний механізм прийняття рішень.

3. Визначити та формалізувати у вигляді лінгвістичних змінних часткові параметри, що визначають необхідність у зрошенні, та побудувати ієрархічне дерево логічного висновку.

4. Розробити математичну модель і алгоритм прийняття рішень щодо визначення параметрів режимів зрошення на основі нечіткого логічного висновку.

5. Провести параметричну ідентифікацію моделі прийняття рішень шляхом настроювання нечіткої моделі генетичними алгоритмами.

6. Розробити інформаційну технологію прийняття рішень щодо визначення строків та норм поливу із використанням розробленого регресійного механізму на основі нечіткої моделі логічного висновку.

7. Розробити комп'ютерну систему підтримки прийняття рішень щодо формування режимів зрошення.

Висновки за розділом 1

1. Проведено аналіз сучасних концепцій моделювання процесів прийняття рішень та розглянуто основні методи визначення строків і норм поливів за етапами їх розвитку; вказано недоліки та переваги кожного методу.

У зв'язку з тим, що основними та найбільш розповсюдженими методами визначення параметрів режимів зрошення є методи, засновані на дослідженні динаміки вологи, було розглянуто основні методи визначення ґрунтової вологи.

2. За різних умов ведення поливів, наявності ресурсів та екологічного стану зрошуваних земель можуть бути застосовані різні режими зрошення. Тому було проведено аналіз існуючих режимів зрошення та описано умови їх застосування.

3. Проведено класифікацію сучасних методів планування зрошення з тим, щоб використати накопичений досвід при побудові математичної моделі діагностування строків та норм поливів на основі нечіткого регресійного механізму логічного висновку.

4. Необхідність урахування багатьох кількісних і якісних змінних, що впливають на визначення строків та норм поливів, викликає труднощі при розв'язанні задачі діагностування поливів. У зв'язку з цим сформульовано ряд проблем, що виникають у задачах прийняття рішень за наявності нечіткої інформації, і поставлено певні задачі дослідження.

РОЗДІЛ 2

РЕГРЕСІЙНИЙ МЕХАНІЗМ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ

2.1. Основні поняття теорії нечітких множин

Складність задач, які виникають у конкретних розробках опису системи і середовища природною мовою, спонукала до появи деяких нових формальних методів і концепцій, які включають теорію нечітких множин.

Нечітка множина утворюється шляхом уведення узагальненого поняття належності, тобто розширення двохелементної множини значень характеристичної функції $\{0, 1\}$ до континуума $[0, 1]$. Це означає, що перехід від повної належності до повної неналежності об'єкта до класу відбувається плавно, поступово, причому належність елемента множині виражається числом з інтервалу $[0, 1]$.

За визначенням Л. Заде, нечіткою множиною є набір (клас) об'єктів, дій або спостережень, пов'язаних з їх відповідними ступенями належності множині [20, 48, 52, 83].

Нечітка множина A визначається як множина впорядкованих пар або кортежів виду $(x, \mu_A(x))$, де x є елементом деякої універсальної множини або універсуму X , а $\mu_A(x)$ – функція належності, що ставить у відповідність кожному із елементів $x \in X$ деяке дійсне число із інтервалу $[0, 1]$, тобто ця функція визначається у формі відображення [44, 79]

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1].$$

Функція належності (membership function) вказує на ступінь належності елемента x підмножині A .

Якщо універсальна множина X – це простір зі скінченною кількістю елементів x_1, x_2, \dots, x_n , то нечітку множину A можна подати у вигляді

$$A = \mu^A(x_1)/x_1 + \mu^A(x_2)/x_2 + \dots + \mu^A(x_n)/x_n = \sum_{i=1}^n \mu^A(x_i)/x_i. \quad (2.1)$$

Якщо ж множина X являє собою простір з нескінченною кількістю

елементів, то в такому випадку використовується наступне позначення [44]:

$$A = \int_X \mu^A(x)/x . \quad (2.2)$$

Основні операції над нечіткими множинами визначаються наступним чином [83].

1. Доповнення нечіткої множини A на множині X називається нечіткою множиною \bar{A} з функцією належності

$$\mu^{\bar{A}}(x) = 1 - \mu^A(x).$$

(2.3)

2. Об'єднання множин:

$$\mu^{A \cup B}(x) = \mu^A(x) \vee \mu^B(x),$$

(2.4)

де \vee – знак операції взяття максимуму.

3. Перетин множин:

$$\mu^{A \cap B}(x) = \mu^A(x) \wedge \mu^B(x),$$

(2.5)

де \wedge – знак операції взяття мінімуму.

Лінгвістичною змінною (linguistic variable) називається змінна, значеннями якої можуть бути слова або речення природної чи штучної мови [20].

Терм-множиною (term set) називається сукупність значень лінгвістичної змінної.

Термом (term) називається елемент терм-множини. У теорії нечітких множин терм формалізується за допомогою функції належності.

Нечітка логіка – це різновид багатозначної логіки, в якій значення істинності задаються лінгвістичними змінними або термами лінгвістичної змінної «істинність».

Позначимо нечіткі змінні через \tilde{A} і \tilde{B} , а функції належності, що надають істинності значенням цих змінних, через $\mu_{\tilde{A}}(u)$ і $\mu_{\tilde{B}}(u)$, $u \in [0,1]$. Нечіткі логічні операції ТА(\wedge), АБО(\vee), НІ($-$) та імплікація (\Rightarrow) виконуються

за такими правилами:

$$\mu_{A \wedge B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u));$$

$$\mu_{A \vee B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u));$$

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = 1 - \mu_A(u);$$

$$\mu_{A \Rightarrow B}(u) = \max(1 - \mu_A(u), \mu_B(u)).$$

Нечітким логічним висновком (fuzzy logic inference) називається апроксимація залежності $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за допомогою нечіткої бази знань й операцій над нечіткими множинами.

2.2. Основні принципи діагностування параметрів режиму зрошення на базі нечіткої логіки

Розглянемо ряд принципів, які будемо використовувати при ідентифікації нелінійних об'єктів нечіткими базами знань. Відповідно до робіт з медичної діагностики на засадах нечіткої логіки [84] та теорії ідентифікації [30, 59, 83, 105] сформулюємо ряд науково-методичних принципів, які будемо використовувати при визначенні строків поливу.

Принцип лінгвістичності вхідних і вихідних змінних, згідно з яким контрольовані параметри й виходи об'єкта ідентифікації задаються лінгвістичними змінними з якісними термами (від англ. term – називати). Наприклад:

* лінгвістична змінна – РЕЖИМ ЗРОШЕННЯ; терми – біологічно оптимальний (бо), оптимально екологічно безпечний (оєб), водозберігаючий (вз), ґрунтозахисний(гз);

* лінгвістична змінна – МЕХАНІЧНИЙ СКЛАД ҐРУНТУ; терми: супіски (сп), легкі суглинки (лсг), середні суглинки (ссг), важкі суглинки (всг),

легкі глини (лг), глини (г), важкі глини (вг);

* лінгвістична змінна – ПЛАЧ ЗРІЗАНОЇ РОСЛИНИ; терми: позитивний (п), немає (н), негативний (нг);

* лінгвістична змінна – ТУРГОР ЛИСТІВ; терми: нормальний (н), середній (с), ослаблений (ос).

Вихідною змінною в задачі ідентифікації об'єкта може бути ДІАГНОЗ НЕОБХІДНОСТІ ПОЛИВУ з наступними класами рішень: немає потреби в поливі, потрібний освіжаючий полив, можливий полив малими поливними нормами, потрібний негайний полив з нормальною поливною нормою.

На основі поняття функції належності кожний терм, який є оцінкою лінгвістичної змінної, формалізується як нечітка множина, що задана на відповідній універсальній множині.

Приклад функцій належності термів – низька (н), середня (с), висока (в), що використовуються для лінгвістичної оцінки змінної «вологість повітря», показано на рис 2.1.

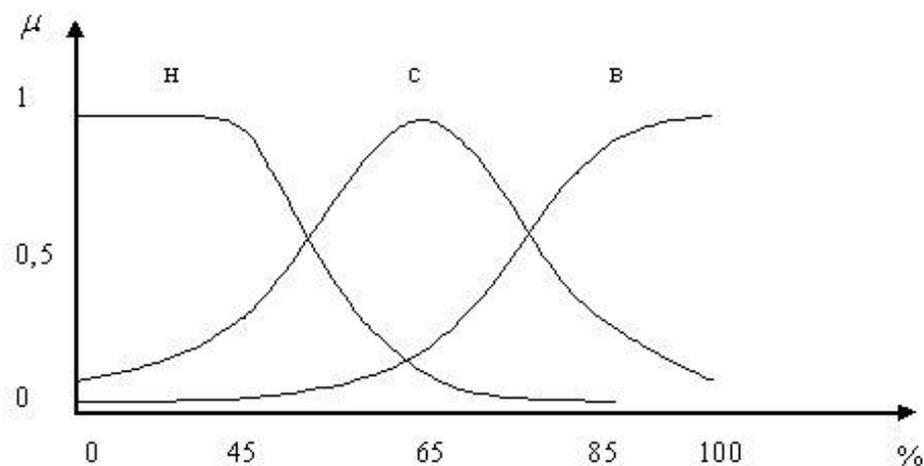


Рис. 2.1. Приклад функції належності

Принцип формування структури залежності «входи – вихід» у вигляді бази нечітких знань полягає в наступному. Нечітка база знань розглядається

як сукупність правил нечітких продукцій типу «ЯКЩО <входи> – ТОДІ <вихід>», котрі відображають досвід експерта у формі причинно-наслідкових зв'язків, характерних для об'єкта ідентифікації.

Елемент нечіткої бази знань з визначення рівня забезпеченості рослини ґрунтовою вологою має наступний вигляд (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Рівень забезпеченості рослини ґрунтовою вологою

x_8 Вологість ґрунту	x_{13} Механічний склад ґрунту	x_{14} Фаза розвитку рослини	y_3 Рівень забезпеченості рослини ґрунтовою вологою
н	л	вц	нкp
нс	л	цз	
н	л	дз	
н	с	вц	

Прикладом експертного продукційного правила з нечіткої бази знань (табл. 2.1) при діагностуванні поливів є наступне висловлювання:

ЯКЩО вологість ґрунту – низька

і за складом ґрунт – легкий,

і рослина знаходиться у фазі розвитку – висадка-цвітіння,

ТОДІ рівень забезпеченості ґрунтовою вологою – нижчий за критичний.

Формування бази нечітких знань є етапом, на якому проектується груба модель об'єкта із параметрами, які необхідно настроїти. У цьому випадку змінними параметрами є параметри функцій належності нечітких термів, що оцінюють входи й виходи об'єкта [83].

Принцип ієрархічності баз знань полягає в наступному. Для моделювання багатовимірних залежностей «входи – вихід» доцільно використовувати ієрархічні системи нечіткого логічного висновку. У цих системах вихідна змінна однієї бази знань є вхідною для іншої бази знань. На

рис. 2.2 наведений приклад ієрархічної нечіткої бази знань, що моделює залежність

$$y_1 = f_1(x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, y_3)$$

із використанням однієї бази знань. Ця база знань описується такою залежністю:

$$y_3 = f_3(x_8, x_{13}, x_{14}),$$

де x_3 – рівень ґрунтових вод; x_4 – опади за поточний період; x_5 – плач; x_6 – тургор листів; x_7 – концентрація клітинного соку (ККС); x_8 – вологість ґрунту від НВ; x_{13} – склад ґрунту; x_{14} – фаза вегетації; y_1 – вологозабезпеченість рослини; y_3 – рівень забезпеченості ґрунтовою вологою.

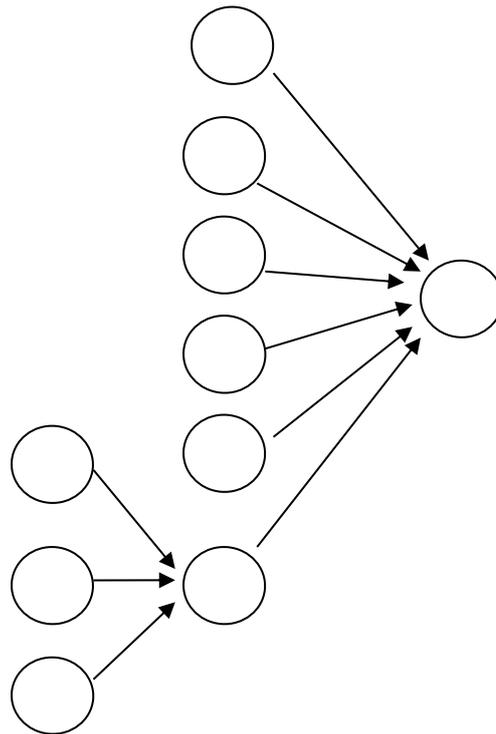


Рис. 2.2. Приклад ієрархічної нечіткої бази знань

Такий принцип дозволяє за допомогою ієрархічної класифікації подолати проблему «прокляття великої розмірності», яка обумовлена тим, що в пам'яті людини одночасно утримується 7 ± 2 поняття, і тому при великій

кількості вхідних змінних побудова системи продукційних правил про невідому залежність значно ускладнюється. Згідно з принципом ієрархічності є доцільним проводити класифікацію вхідних змінних і будувати дерево логічного висновку, що визначає послідовність виконання операцій такого висновку. Використання принципу ієрархічності дозволяє враховувати велику кількість вхідних змінних, що впливають на оцінку виходу. При цьому треба дотримуватись, щоб кількість входів у кожному вузлі дерева відповідала правилу 7 ± 2 [105].

Принцип триваріантного оцінювання значень параметрів стану полягає в наступному. Згідно з цим принципом контрольований параметр можна оцінити наступним чином:

- числом – при кількісному значенні оцінки контрольованого параметра за наявності інструментальних засобів для відповідних вимірювань;
- лінгвістичним термом – коли параметр стану є якісною змінною і значення його задається лінгвістичною оцінкою з відповідної термножини;
- за принципом термометра – коли значення вхідної змінної можна оцінити інтуїтивно шляхом зафарбуванням частини шкали (рис. 2.3), в якій ліва й права межі відповідають найменшому і найбільшому рівням тієї певної змінної.

Прикладом оцінювання числом може виступати «вологість ґрунту від НВ», $[0, 100]$, % , «температура повітря», $[0, 50]$, °С. Для другого варіанта прикладом такого параметра є «тип ґрунтів», який може задаватися на дискретній множині {дерново-підзолистий (дп), сірий лісовий (сл), світло-сірий лісовий, (ссл), темно-сірий лісовий (тсл), чорнозем опідзолений (чоп), чорнозем південний (чпд), чорнозем звичайний (чзв), чорнозем потужний (чпт), каштанові (к)}. Підхід за принципом термометра зручно застосовувати тоді, коли експерт інтуїтивно відчуває рівень деякої змінної і не в змозі оцінити її значення ні числом, ні якісним термом. Наприклад, такий показник,

як «структурність ґрунту», неможливо точно визначити числом або термами {структура, слабо структурна, агрономічно цінна}, бо іноді досить складно буває визначити чітку межу між ними.

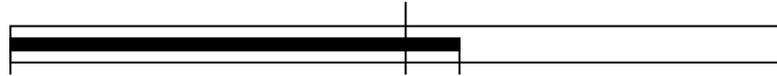


Рис. 2.3. Принцип термометра

Принцип двоетапної настройки баз нечітких знань полягає в наступному. Відповідно до цього принципу, побудова моделі нелінійного об'єкта здійснюється за два етапи, які є аналогією етапів структурної і параметричної ідентифікації, характерних для класичних методів [105, 83].

Перший етап складається з формування за експертною інформацією моделі об'єкта шляхом побудови бази знань і грубої настройки цієї моделі [84]. Такий підхід є традиційним для нечітких систем і не гарантує збіг теоретичних і експериментальних даних. Другий етап необхідний для проведення точної настройки нечіткої моделі шляхом її навчання за експериментальними даними. Навчання моделі полягає в підборі параметрів функцій належності і вагових коефіцієнтів правил ЯКЦО – ТОДІ шляхом мінімізації різниці між бажаними експериментальними і теоретичними даними. Навчання нечіткої моделі доцільно проводити методами еволюційного програмування – генетичними алгоритмами, які є аналогом випадкового пошуку з використанням операцій схрещення, мутації та селекції [83, 111, 118].

2.3. Моделювання функцій належності базами нечітких знань

2.3.1. Моделі функцій належності

За визначенням із роботи [20], функція належності $\mu^T(x)$ характеризує

суб'єктивну міру (в діапазоні $[0, 1]$) впевненості експерта у тому, що чітке значення x відповідає нечіткому терму T .

За допомогою нечітких множин формалізується неточне визначення контрольованих параметрів у вигляді лінгвістичних змінних. Тому значення таких змінних у вигляді терм-множини характеризується через функції належностей до цих термів.

Функції належностей можуть бути отримані прямими або непрямими спеціально розробленими методами, серед яких найбільшого поширення отримали: метод попарних порівнянь, метод обробки статистичних даних [11] і метод статистичної обробки експертної інформації [11, 121]. Ці методи застосовують переважно при побудові грубої нечіткої моделі і використовують лише експертні знання. При побудові точної моделі використовуються алгоритмічні процедури визначення параметрів функцій належності, що засновані на нейронних мережах та генетичних алгоритмах, коли навчання здійснюється за експериментальними даними.

У теорії нечітких множин існує багато типових форм функції належності, які мають 2, 3 або 4 параметри, але на практиці найбільшого розповсюдження отримали трикутні, трапецієподібні та дзвіноподібні функції належності [83, 121], параметри яких можуть змінювати їх форму. Графіки цих функцій наведені на рис. 2.4 – 2.6.

Трикутна модель функції належності має три параметри: координати максимуму (c) та мінімумів (a та b).

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, x \geq b \\ \frac{x-a}{c-a}, & a < x \leq c \\ \frac{b-x}{b-c}, & c < x < b \end{cases} . \quad (2.6)$$

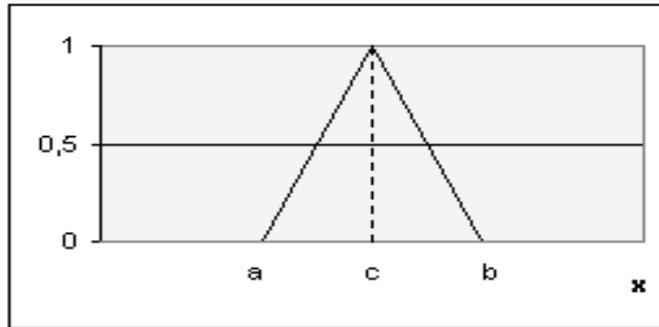


Рис. 2.4. Трикутна функція належності

Трапецієподібна модель функції належності має чотири параметри: координати максимуму (c та d) та мінімумів (a та b).

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a, x \geq b \\ \frac{x-a}{c-a} & a < x < c \\ 1 & c \leq x \leq d \\ \frac{b-x}{b-d} & d < x < b \end{cases} . \quad (2.7)$$

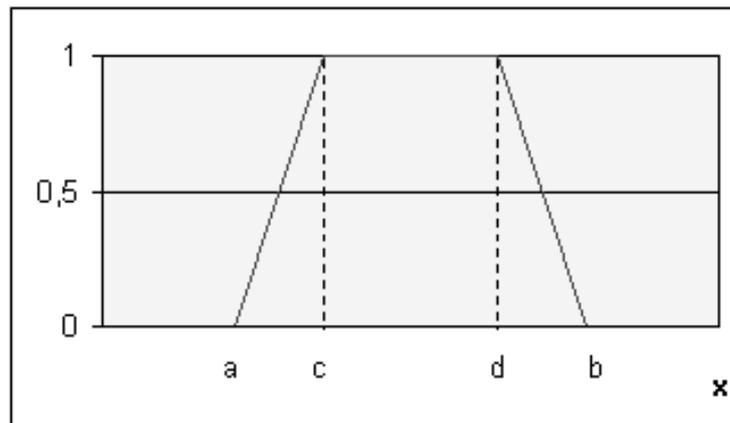


Рис. 2.5. Трапецієподібна функція належності

Дзвіноподібна модель функції належності має два параметри, якими є координата максимуму (b) та коефіцієнт концентрації (c).

Існує цілий клас так званих дзвіноподібних кривих, до яких відноситься

запропонована в роботах [85, 89] зручна для настройки аналітична модель функції належності змінної x до довільного нечіткого терму T у вигляді

$$\mu^T(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, \quad (2.8)$$

де b і c – параметри настройки: b – координата максимуму функції $\mu^T(b) = 1$; c – коефіцієнт концентрації – розтягування функції.

Дзвіноподібна функція належності має найменшу кількість параметрів, що зменшує розмірність задачі підбору цих параметрів при навчанні нечіткої моделі.

Ще одним із зручних способів завдання таких моделей є залежність виду

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}.$$

2.3.2. Залежність типу «багато входів – вихід»

Багатофакторна залежність з одним виходом і n входами має вид

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.9)$$

де y – вихідна змінна, значення якої визначає діагноз поливу;

x_1, x_2, \dots, x_n – вхідні змінні, що визначають стан зрошуваного масиву.

Змінні x_1, x_2, \dots, x_n і y можуть бути як кількісними, так і якісними [83].

Приклади кількісних змінних:

КОНЦЕНТРАЦІЯ КЛІТИННОГО СОКУ (ККС) = $[0, 20]$, %;

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ = $[0, 15]$, м/с;

ГЛИБИНА РОЗРАХУНКОВОГО ШАРУ ҐРУНТУ = $[0, 2]$, м

та інші, що можуть бути виміряні кількісно із прийнятих для них діапазонів.

Існують вхідні змінні, для яких не існує кількісної шкали і вони можуть бути виміряні тільки якісно. Прикладом таких змінних є МЕХАНІЧНИЙ СКЛАД ҐРУНТУ, який може оцінюватись якісними термами (супіски (сп), легкі суглинки (лсг), середні суглинки (ссг), важкі суглинки (всг), легкі глини (лг), глини (г)).

Області визначення кількісних змінних характеризуються відомими інтервалами:

$$U_i = \left[\underline{x}_i, \bar{x}_i \right], \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.10)$$

$$Y = \left[\underline{y}, \bar{y} \right], \quad (2.11)$$

де \underline{x}_i та \bar{x}_i – нижнє та відповідно верхнє значення вхідної змінної X_i , $i = \overline{1, n}$;

\underline{y} та \bar{y} – нижнє та відповідно верхнє значення вихідної змінної Y .

Множини всіх можливих значень якісних змінних $X_1 \div X_n$ і Y характеризуються наступним чином:

$$U_i = \left\{ v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^{q_i} \right\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.12)$$

$$Y = \left\{ y^1, y^2, \dots, y^{q_m} \right\}, \quad (2.13)$$

де $v_i^1, v_i^{q_i}$ – бальна оцінка, що відповідає найменшому та відповідно найбільшому значенню вхідної змінної X_i ;

y^1, y^{q_m} – бальна оцінка, що відповідає найменшому та відповідно найбільшому значенню вихідної змінної Y ;

$q_i, i = \overline{1, n}$ і q_m – кількість термів множин (2.12) і (2.13) лінгвістичних

змінних, причому в загальному випадку $Q_1 \neq Q_2 \neq \dots \neq Q_n \neq Q_m$ [83, 84].

2.3.3. Лінгвістичність вхідних та вихідної змінних

Розглянемо задачу визначення вихідної змінної за наявності залежності (2.9) за заданим вектором фіксованих значень вхідних змінних (зрощуваного масиву) $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$, де $x_i^* \in U_i$, $i = \overline{1, n}$. Тобто потрібно визначити клас рішень $d^* \in Y$ на основі інформації про вхідний вектор X^* . Для встановлення такої залежності розглянемо вхідні змінні x_i , $i = \overline{1, n}$, і діагноз d як лінгвістичні змінні [20], що визначаються на заданих множинах (2.10), (2.11) або (2.12), (2.13).

Оцінки лінгвістичних змінних X_i , $i = \overline{1, n}$ будемо описувати термами з наступних терм-множин:

$$A_i = \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{l_i}\} - \text{терм-множина змінної } X_i, i = \overline{1, n};$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\} - \text{терм-множина змінної } Y, \text{ де}$$

$$a_i^p - p\text{-й лінгвістичний терм змінної } X_i, p = \overline{1, l_i}, i = \overline{1, n};$$

$$d_j - j\text{-й лінгвістичний терм змінної } Y, j = \overline{1, m};$$

m – кількість різних можливих класів-рішень змінної Y у встановленій області її значень.

Назви та кількість окремих термів $a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{l_i}$ з терм-множин A_i можуть відрізнятися для кожної із лінгвістичних змінних x_i , $i = \overline{1, n}$. Тому в загальному випадку $l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n$. Наприклад, ТУРГОР ЛИСТКІВ {нормальний, середній, ослаблений}, ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ {низька, нижче середнього, середня, вище за середнього, висока}, ПЛАЧ ЗРІЗАНОЇ РОСЛИНИ {позитивний, немає, негативний}.

Лінгвістичні терми a_i^p і d_j з відповідних терм-множин A_i і D , $p = \overline{1, l_i}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$ будемо вважати нечіткими множинами на заданих універсумах U_i і Y , що визначаються співвідношеннями (2.10) – (2.13).

Розглянемо ситуації, коли вхідні та вихідна змінні можуть бути описані кількісно або якісно.

При кількісному характері змінних X_i , $i = \overline{1, n}$ і Y нечіткі множини a_i^p і d_j запишемо у вигляді:

$$a_i^p = \int_{\underline{x_i}}^{\overline{x_i}} \mu^{a_i^p}(x_i) / x_i, \quad (2.14)$$

$$d_j = \int_{\underline{y}}^{\overline{y}} \mu^{d_j}(y) / y, \quad (2.15)$$

де $\mu^{a_i^p}(x_i)$ – функція належності значення контрольованого параметра $x_i \in [\underline{x_i}, \overline{x_i}]$ до терму $a_i^p \in A_i$, $p = \overline{1, l_i}$, $i = \overline{1, n}$;

$\mu^{d_j}(y)$ – функція належності значення вихідної змінної $y \in [\underline{y}, \overline{y}]$ до терму $d_j \in D$, $j = \overline{1, m}$.

При якісному характері змінних X_i , $i = \overline{1, n}$, і Y нечіткі множини a_i^p і d_j запишемо у вигляді

$$a_i^p = \sum_{k=1}^{q_i} \mu^{a_i^p}(v_i^k) / v_i^k, \quad (2.16)$$

$$d_j = \sum_{r=1}^{q_m} \mu^{d_j}(y^r) / y^r, \quad (2.17)$$

де $\mu^{a_i^p}(v_i^k)$ – ступінь належності елемента $v_i^k \in U_i$ до терму $a_i^p \in A_i$,
 $p = \overline{1, l_i}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, q_i}$;
 $\mu^{d_j}(y^r)$ – ступінь належності елемента $y^r \in Y$ до терму $d_j \in D$,
 $j = \overline{1, m}$.

U_i і Y – множини, що задані співвідношеннями (2.12) і (2.13).

Знаки інтеграла та суми у співвідношеннях (2.14) – (2.17), як і в формулах (2.1), (2.2), позначають об'єднання пар $\mu(u)/u$ у спільну сукупність.

При побудові нечіткої моделі процедура визначення термів з термножин змінних і їх функцій належності одержала назву фазифікації змінних (від англ. fuzzification). Це є першим етапом при побудові нечіткої моделі, що формалізується залежністю (2.9).

2.3.4. Нечіткі бази знань

Для розв'язання неформалізованих задач визначення багатовимірної залежності «входи – вихід» за наявності нечіткої інформації застосовується метод моделювання нечіткими базами знань, що визначають причинно-наслідкові зв'язки між вхідними змінними та вихідною величиною.

Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил «ЯКЩО – ТОДІ», що визначають взаємозв'язок між входами й виходами досліджуваного об'єкта [106]. Узагальнений формат нечітких правил такий:

ЯКЩО <посилка правила>, ТОДІ <висновок правила>.

Нечітке правило записується у формі

R_i : ЯКЩО x_1 – це a_{i1} ... ТА ... x_n – це a_{in} , ТО y – це D_i .

Посилка правила (антецедент) x_l це a_{il} розглядається як твердження типу « x є легкі глини», де «легкі глини» – це терм (лінгвістичне значення) змінної x , що задається нечіткою множиною.

Висновок правила (консеквент) « y це D_i » може задаватися наступним чином:

нечітким термом: « y є сприятливий»;

класом рішень: « y є освіжаючий полив»;

чіткою константою: « $y=300$ »;

чіткою функцією від вхідних змінних: « $y = 2 + 3x$ ».

Для завдання багатовимірних залежностей «входи – виходи», наприклад «фактори, що визначають необхідність у зрошенні, – діагноз поливу», за експертною інформацією використовують нечіткі логічні операції ТА й АБО. Посилки правил поєднуються логічною операцією ТА, а правила в базі знань зв'язуються операцією АБО. Тоді нечітку базу знань, що пов'язує входи $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ з виходом D , можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{11}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{11}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{11}) \text{ АБО} \\ &\quad (x_1 = a_1^{12}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{12}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{12}) \text{ АБО } \dots \\ &\quad (x_1 = a_1^{1k_1}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{1k_1}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{1k_1}), \end{aligned}$$

ТОДІ $y = d_1$, ІНАКШЕ

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{21}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{21}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{21}) \text{ АБО} \\ &\quad (x_1 = a_1^{22}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{22}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{22}) \text{ АБО } \dots \\ &\quad (x_1 = a_1^{2k_2}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{2k_2}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{2k_2}), \end{aligned}$$

ТОДІ $y = d_2$, ІНАКШЕ ...

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{m1}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{m1}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{m1}) \text{ АБО} \\ &\quad (x_1 = a_1^{m2}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{m2}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{m2}) \text{ АБО } \dots \\ &\quad (x_1 = a_1^{mk_m}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{mk_m}), \text{ ТА } \dots, \text{ ТА } (x_n = a_n^{mk_m}), \end{aligned}$$

$$\text{ТОДІ } y = d_m, \quad (2.18)$$

де a_i^{jp} – лінгвістична оцінка значення вхідної змінної x_i у правилі з номером jp , яка вибирається з відповідної терм-множини A_i ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, $p = \overline{1, k_j}$);

k_j – кількість правил, що відповідають значенню вихідної змінної $y = d_j$;

d_j ($j = \overline{1, m}$) – лінгвістична оцінка вихідної змінної Y , що визначається з терм-множини D [83].

У більш компактній формі логічні висловлювання (2.18) з використанням операцій \cup (АБО) і \cap (ТА) можна записати наступним чином:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \longrightarrow y = d_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.19)$$

Якщо відомо N експертних правил, що відображають залежність між входами та вихідною величиною, та при цьому значенню d_j вихідної змінної y , $j = \overline{1, m}$ відповідають k_j правил, тобто

$$N = k_1 + k_2 + \dots + k_j + \dots + k_m, \quad (2.20)$$

тоді нечітку базу знань можна записати у вигляді таблиці, яку називають матрицею знань (табл. 2.2).

За нечіткою базою знань можна завжди розраховувати значення d_j при кількості правил, що значно менша від повного перебору різних комбінацій можливих значень вхідних змінних:

$$N < l_1 \cdot l_2 \cdot \dots \cdot l_n, \quad \text{де } l_i \text{ – кількість термів змінної } x_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

У цьому і полягає одна з основних переваг використання нечіткого

логічного висновку порівняно з дедуктивним логічним висновком, реалізованим мовою Пролог.

Таблиця 2.2

Матриця знань

Номер вхідної комбінації	ЯКЩО				ТОДІ
	x_1	x_2	$\dots x_i \dots$	x_n	y
11	a_1^{11}	a_2^{11}	$\dots a_i^{11} \dots$	a_n^{11}	d_1
12	a_1^{12}	a_2^{12}	$\dots a_i^{12} \dots$	a_n^{12}	
...	
1_{k_1}	$a_1^{1k_1}$	$a_2^{1k_1}$	$\dots a_i^{1k_1} \dots$	$a_n^{1k_1}$	
...
$j1$	a_1^{j1}	a_2^{j1}	$\dots a_i^{j1} \dots$	a_n^{j1}	d_j
$j2$	a_1^{j2}	a_2^{j2}	$\dots a_i^{j2} \dots$	a_n^{j2}	
...	
jk_j	$a_1^{jk_j}$	$a_2^{jk_j}$	$\dots a_i^{jk_j} \dots$	$a_n^{jk_j}$	
...
$m1$	a_1^{m1}	a_2^{m1}	$\dots a_i^{m1} \dots$	a_n^{m1}	d_m
$m2$	a_1^{m2}	a_2^{m2}	$\dots a_i^{m2} \dots$	a_n^{m2}	
...	
mk_m	$a_1^{mk_m}$	$a_2^{mk_m}$	$\dots a_i^{mk_m} \dots$	$a_n^{mk_m}$	

Розглянемо наступні позначення матриці знань:

$11, 12, \dots, 1_{k_1}$ – номери правил з нечіткої бази знань, що відповідають

значенню виходу d_1 ;

$21, 22, \dots, 2k_2$ – номери правил з нечіткої бази знань, що відповідають

значенню виходу d_2 ;

...

$1, 2, \dots, k_j$ – номери правил з нечіткої бази знань, що

відповідають значенню виходу d_j ;

...

$1, 2, \dots, k_m$ – номери правил з нечіткої бази знань, що

відповідають значенню виходу d_m .

Матриця знань формується по нечіткій базі знань за такими правилами [83]:

1) розмірність матриці дорівнює $(n+1) \times N$, де $(n+1)$ – кількість стовпчиків, а $N = k_1 + k_2 + \dots + k_m$ – кількість рядків;

2) перші n стовпчиків матриці відповідають вхідним змінним X_i , $i = \overline{1, n}$, а $(n+1)$ -й стовпчик відповідає значенням d_j вихідної змінної Y , $j = \overline{1, m}$;

3) кожен рядок матриці являє собою деяку комбінацію значень вхідних змінних, віднесену експертом до одного з можливих значень вихідної змінної Y , при цьому перші k_1 рядків відповідають значенню вихідної змінної $Y = d_1$, наступні k_2 рядків – значенню $Y = d_2$ і т. і., а останні k_m рядків – значенню $Y = d_m$;

4) елемент a_i^{jp} , що знаходиться на перетині i -го стовпчика і jp -го рядка, відповідає лінгвістичній оцінці параметра X_i в рядку матриці знань з номером jp . Лінгвістична оцінка a_i^{jp} вибирається із терм-множини, що

відповідає змінній X_i , тобто $a_i^{jp} \in A_i$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, $p = \overline{1, k_j}$.

Отже, задача визначення причинно-наслідкових зав'язків багатовимірної залежності «входи – вихід» у вигляді (2.9) за наявності нечіткої інформації може бути розв'язана шляхом побудови нечіткої бази знань (2.18) та матриці знань (табл. 2.2).

Для уникнення «прокляття великої розмірності» при моделюванні багатовимірних залежностей «входи – вихід» використовують принцип ієрархічності нечітких баз знань, за яким вихід однієї бази знань є входом для бази знань більш високого рівня ієрархії.

При побудові нечітких баз знань експертні правила можна подавати у «неповному форматі», якщо окремі значення вхідних змінних не впливають на вибір певного класу рішення із терм-множини вихідної змінної. Тоді змінні, значення яких не впливають на висновок правила, позначають знаком «-».

2.4. Ідентифікація нелінійних залежностей за системою нечітких логічних рівнянь

2.4.1. Узагальнена модель нечіткого логічного висновку

Розглянемо моделювання нелінійних залежностей на основі нечіткого логічного висновку Мамдані, спираючись на роботи [83 – 85, 106].

Нечіткий логічний висновок за алгоритмом Мамдані здійснюється з використанням бази знань типу (2.18), де значення вхідних та вихідних змінних представлені нечіткими множинами. Вихідна змінна розглядається як множина нечітких термів-розв'язків $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$. Якщо вихідна величина задана на неперервній множині та характеризується інтервалом $[y, \bar{y}]$, необхідно його розбити на m підінтервалів наступним чином:

$$[y, \bar{y}] = \underbrace{[y, y_1]}_{d_1} \cup \underbrace{[y_1, y_2]}_{d_2} \cup \dots \cup \underbrace{[y_{j-1}, y_j]}_{d_j} \cup \dots \cup \underbrace{[y_{m-1}, \bar{y}]}_{d_m}. \quad (2.21)$$

Вибір нечіткої бази знань типу Мамдані зумовлений відсутністю труднощів у експертів при гранулюванні знань.

При нечіткому моделюванні залежностей типу (2.9) будемо вважати відомою наступну інформацію:

- множини вхідних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ та вихідних $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ змінних, що відповідають моделі (2.9);
- універсальні множини, яким належать значення кожної вхідної змінної $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$, $i = \overline{1, n}$ та вихідної $y \in [\underline{y}, \overline{y}]$ (за умови неперервного виходу);
- функції належності змінних x_i , $i = \overline{1, n}$ до нечітких термів у вигляді нечітких множин (2.14) або (2.16);
- нечіткі бази знань, побудовані за експертною інформацією.

При моделюванні процесів типу (2.9) основним завданням є визначення вихідної величини $y \in D$, що відповідає фіксованому вектору вхідних змінних

$$X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle, \quad x_i^* \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i].$$

У задачах прийняття рішення (наприклад, при визначенні строків та норм поливу) будемо використовувати випадок вихідної змінної з дискретним виходом.

2.4.2. Система нечітких логічних рівнянь

Для ідентифікації нелінійних залежностей нечіткими базами знань типу Мамдані використовуються нечіткі логічні рівняння, що будуються за нечіткими матрицями знань. За системою таких нечітких логічних рівнянь визначаються функції належності вихідної величини до нечітких термів-

$$\text{розв'язків } D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}.$$

Лінгвістичні терми $a_i^{j\rho}$ кожної із змінних x_i представимо у вигляді

нечітких множин, які визначені на універсальних множинах $U_i = \left[\underline{x}_i, \overline{x}_i \right]$, $i = \overline{1, n}$, за допомогою дзвіноподібні функції належності (2.8).

Для побудови системи нечітких логічних рівнянь за нечіткою базою знань (2.19) використовуються наступні позначення [83]:

$\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$ – функція належності параметра $x_i \in \left[\underline{x}_i, \overline{x}_i \right]$ до нечіткого терму a_i^{jp} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, $p = \overline{1, k_j}$;

$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція належності вектора вхідних змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ значенню вихідної змінної $y = d_j$, $j = \overline{1, m}$.

З використанням уведених позначень зв'язок між функціями належностей входів та виходу визначається на основі нечіткої бази знань і функцій належності термів наступною системою нечітких логічних рівнянь [83]:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \left[\mu^{a_1^{11}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{11}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{11}}(x_n) \right] \vee \\ &\vee \left[\mu^{a_1^{12}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{12}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{12}}(x_n) \right] \vee \dots \\ &\dots \vee \left[\mu^{a_1^{1k_1}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{1k_1}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{1k_1}}(x_n) \right], \\ \\ \mu^{d_2}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \left[\mu^{a_1^{21}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{21}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{21}}(x_n) \right] \vee \\ &\vee \left[\mu^{a_1^{22}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{22}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{22}}(x_n) \right] \vee \dots \\ &\dots \vee \left[\mu^{a_1^{2k_2}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{2k_2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{2k_2}}(x_n) \right], \\ \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_m}(x_1, x_2, \dots, x_n) = & \left[\mu^{a_1^{m1}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{m1}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{m1}}(x_n) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^{a_1^{m2}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{m2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{m2}}(x_n) \right] \vee \dots \\ & \dots \vee \left[\mu^{a_1^{mk_m}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{mk_m}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_n^{mk_m}}(x_n) \right], \quad (2.22) \end{aligned}$$

де \vee – логічне АБО, \wedge – логічне І.

Скорочено систему нечітких логічних рівнянь записують наступним чином:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[\bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.23)$$

2.4.3. Алгоритм нечіткого логічного висновку

Для прийняття рішення $d^* \in D = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ при певному векторі вхідних змінних $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ використовується нечіткий логічний висновок Мамдані за таким алгоритмом:

1. Визначити значення вхідних змінних $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ за певної ситуації прийняття рішення.

2. Обчислити значення функцій належності змінних x_i до їх нечітких термів для заданих значень вхідних змінних $X_1^* \div X_n^*$.

Функції належності кількісних змінних $x_i \in \left[\underline{x_i}, \overline{x_i} \right]$ до нечіткого терму a_i^{jp} для заданих значень вхідних змінних $X_1^* \div X_n^*$ розраховуються за формулами (2.6) – (2.8). При якісному визначенні вхідної змінної x_i значення

функцій належності $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$ визначаються як висота перетину нечітких множин x_i та a_i^{jp} .

3. Підставити знайдені функції належності $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$ у логічні рівняння (2.23) та обчислити значення функцій належності $\mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ вектора вхідних змінних X^* до всіх класів-рішень d_j , $j = \overline{1, m}$, використовуючи операції І (\wedge) та АБО (\vee) над функціями належності як операції \min і \max відповідно:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_{p=1}^{k_j} \left[\min_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.24)$$

У результаті отримаємо нечітку множину у вигляді

$$\tilde{y} = \left\{ \frac{\mu^{d_1}(y)}{d_1}, \frac{\mu^{d_2}(y)}{d_2}, \dots, \frac{\mu^{d_m}(y)}{d_m} \right\}. \quad (2.25)$$

4. Із множини термів d_j , $j = \overline{1, m}$ вихідної змінної обирається те рішення, значення функції належності якого є найбільшим:

$$\mu^{d_j^*}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = \max_{j=1, m} \left(\mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \right). \quad (2.26)$$

За умов неперервної вихідної змінної отримаємо нечітку множину у вигляді

$$\tilde{y} = \left\{ \frac{d_1(y)}{[y, y_1]}, \frac{d_2(y)}{[y_1, y_2]}, \dots, \frac{d_m(y)}{[y_{m-1}, \bar{y}]} \right\}. \quad (2.27)$$

Щоб одержати результат у вигляді чіткого числа з інтервалу $[y, \bar{y}]$ за нечіткою множиною (2.27), необхідно провести дефазифікацію [121] (від англ. defuzzification) отриманого результату, що визначає звичайне чітке значення вихідної змінної.

Найбільшого розповсюдження серед методів дефазифікації отримав метод центра тяжіння, за яким

$$y^* = \frac{y\mu^{d_1}(y) + y_1\mu^{d_2}(y) + \dots + y_{m-1}\mu^{d_m}(y)}{\mu^{d_1}(y) + \mu^{d_2}(y) + \dots + \mu^{d_m}(y)}. \quad (2.28)$$

Для зручності розрахунків чіткого значення y^* (2.28) інтервал $[y, \bar{y}]$ розбивають на m рівних частин, тобто

$$y_1 = \underline{y} + \Delta, \quad y_2 = \underline{y} + 2\Delta, \quad \dots, \quad y_{m-1} = \bar{y} - \Delta, \quad \Delta = \frac{\bar{y} - \underline{y}}{m-1}. \quad (2.29)$$

Із застосуванням розбиття інтервалу $[y, \bar{y}]$ згідно з формулою (2.29) формула (2.28) приймає вигляд

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^m [\underline{y} + (j-1)\Delta] \mu^{d_j}(y)}{\sum_{j=1}^m \mu^{d_j}(y)}. \quad (2.30)$$

Наведений алгоритм можна представити у вигляді наступної схеми знаходження результату нечіткого логічного висновку (рис. 2.6), що визначає

послідовність виконання операцій \min і \max над функціями належностей вхідних змінних до їх лінгвістичних термів за нечіткою базою знань.

$\mu^{11}(x_1)$	$\mu^{11}(x_2)$	...	$\mu^{11}(x_n)$
$\mu^{12}(x_1)$	$\mu^{12}(x_2)$	...	$\mu^{12}(x_n)$
...
$\mu^{1k_1}(x_1)$	$\mu^{1k_1}(x_2)$	...	$\mu^{1k_1}(x_n)$
...
$\mu^{21}(x_1)$	$\mu^{21}(x_2)$	...	$\mu^{21}(x_n)$
$\mu^{22}(x_1)$	$\mu^{22}(x_2)$	...	$\mu^{22}(x_n)$
...
$\mu^{2k_2}(x_1)$	$\mu^{2k_2}(x_2)$	...	$\mu^{2k_2}(x_n)$
...
$\mu^{m1}(x_1)$	$\mu^{m1}(x_2)$	...	$\mu^{m1}(x_n)$
$\mu^{m2}(x_1)$	$\mu^{m2}(x_2)$	...	$\mu^{m2}(x_n)$
...
$\mu^{mk_m}(x_1)$	$\mu^{mk_m}(x_2)$	...	$\mu^{mk_m}(x_n)$

Рис. 2.6. Схема реалізації алгоритму прийняття рішення

Таким чином, за допомогою нечіткого логічного висновку Мамдані можна розраховувати значення вихідної змінної будь-якої нелінійної залежності (2.9) у ситуації, коли набір вхідних параметрів утворює вектор $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$.

2.5. Система нечіткого логічного висновку

Розглянемо типову структуру нечіткого логічного висновку, що визначає послідовність виконання логічного висновку при апроксимації

нелінійної залежності типу (2.9). Система нечіткого логічного висновку представлена на рис. 2.7 [106].

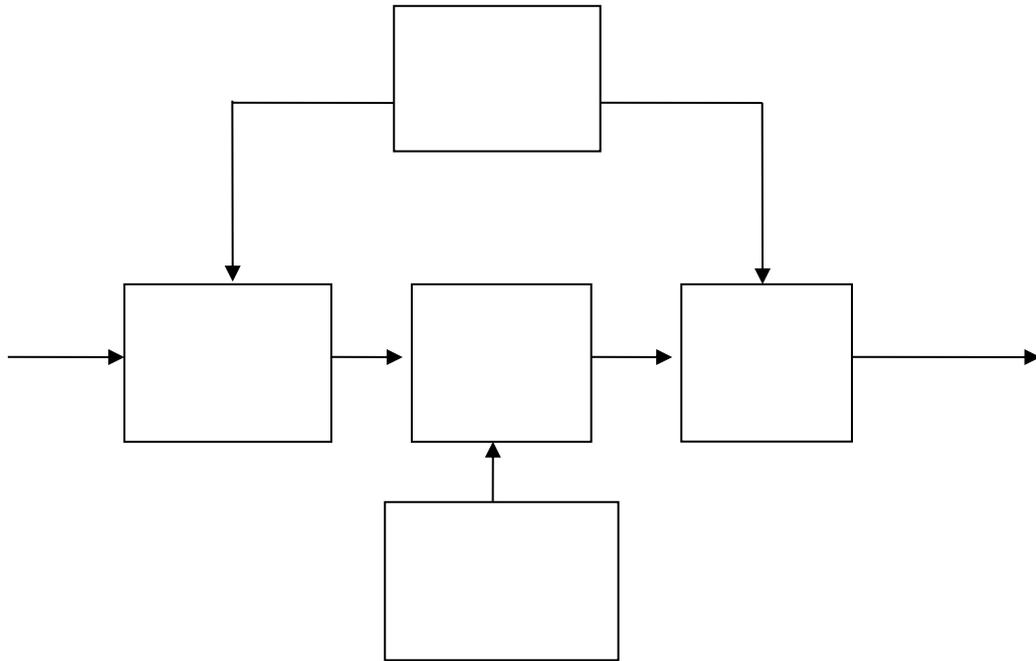


Рис 2.7. Система нечіткого логічного висновку

Позначення:

X – чіткий вектор вхідних змінних;

\tilde{X} – вектор нечітких множин, що відповідає вхідному вектору X ;

\tilde{Y} – нечіткий вектор значень вихідної змінної як результат логічного висновку;

Y – чітке значення вихідної змінної.

Розглянемо функції модулів системи нечіткого логічного висновку.

«Фазифікатор» здійснює перетворення значень кількісних та якісних вхідних змінних (X) у нечітку форму – вектор (\tilde{X}) ступенів належності вхідних змінних до нечітких термів.

«Функції належності», що задані в аналітичному вигляді, дозволяють представляти лінгвістичні терми як нечіткі множини та розраховувати ступені належності значень вхідних змінних до нечітких термів.

«Нечітка база знань» містить експертні знання у вигляді лінгвістичних правил типу «ЯКЩО – ТОДІ».

«Машина нечіткого висновку» за нечіткою базою знань визначає діагноз поливу в вигляді нечіткої множини (\tilde{Y}) при певному векторі вхідних змінних.

«Дефазифікатор» визначає чітке значення (Y) вихідної змінної у вигляді класу рішення або чіткого числа.

2.6. Нечіткий регресійний механізм логічного висновку

Представлена у формі (2.23) процедура отримання нечіткого логічного висновку, по суті, є реалізацією нечіткої продукційної експертної системи зі всіма недоліками, властивими таким системам. Серед них найбільш істотними є наступні:

1. Відсутня можливість обліку відмінностей у важливості контрольованих вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_n .
2. Жорстка схема логічного виводу, що задається матрицею, представленою на рис. 2.7, може призвести до неконтрольованих помилок у діагнозі (для цього достатньо, щоб мінімальне значення функції належності тільки для одного з правил субпродукції було більше за інших).
3. Кількість правил бази знань значно менша за кількість можливих варіантів значень вхідних змінних, отже, на практиці можуть виникати варіанти, не передбачені в базі знань.
4. У системах такого типу, особливо, якщо число вхідних змінних велике, практично неможливо врахувати синергетичний ефект, який можливий при спільній появі деяких конкретних значень окремих змінних.

Ці обставини роблять доцільною розробку технології, яка більшою мірою, ніж продукційна система, послідовно, ортодоксально відповідає б моделі (2.9). З цією метою розглянемо можливість використання для розв'язання завдання визначення діагнозу поливу, лінійного за параметрами,

але нелінійного за факторами рівняння регресії. Уважатимемо, що парні взаємодії змінних у достатній мірі визначають появу синергетичного ефекту.

Припустимо, що проведено серію N вимірів значень контрольованих змінних, у результаті яких отримано матрицю

$$H = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1i} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2i} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{l1} & x_{l2} & \dots & x_{li} & \dots & x_{ln} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{Ni} & \dots & x_{Nn} \end{pmatrix}.$$

Тут вектор $X_l = (x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{li}, \dots, x_{ln})$ відповідає результатам проведення l -го експерименту. Отримані дані використовуємо таким чином. Кожному значенню x_{li} поставимо у відповідність m чисел

$$(z_i^{1l}, z_i^{2l}, \dots, z_i^{jl}, \dots, z_i^{ml}), i = \overline{1, n},$$

де z_i^{jl} – число, що встановлює, якою мірою значення x_{li} змінної x_i в l -му експерименті сприятливе для реалізації j -го варіанта поливу, $z_i^{jl} \in [0, 1]$.

Одночасно вектору X_l поставимо у відповідність m чисел

$$(d_1^l, d_2^l, \dots, d_j^l, \dots, d_m^l), l = \overline{1, N},$$

де d_j^l – ступінь доцільності використання j -го варіанта поливу за ситуацією, коли набір контрольованих параметрів утворює вектор X_l , $d_j^l \in [0, 1]$.

З використанням цих наборів введемо матриці

$$H_1 = \begin{pmatrix} z_1^{11} & z_2^{11} & \dots & z_i^{11} & \dots & z_n^{11} & z_1^{11} z_2^{11} & z_1^{11} z_3^{11} & \dots & z_{i_1}^{11} z_{i_2}^{11} & \dots & z_{n-1}^{11} z_n^{11} \\ z_1^{12} & z_2^{12} & \dots & z_i^{12} & \dots & z_n^{12} & z_1^{12} z_2^{12} & z_1^{12} z_3^{12} & \dots & z_{i_1}^{12} z_{i_2}^{12} & \dots & z_{n-1}^{12} z_n^{12} \\ \dots & \dots \\ z_1^{1l} & z_2^{1l} & \dots & z_i^{1l} & \dots & z_n^{1l} & z_1^{1l} z_2^{1l} & z_1^{1l} z_3^{1l} & \dots & z_{i_1}^{1l} z_{i_2}^{1l} & \dots & z_{n-1}^{1l} z_n^{1l} \\ \dots & \dots \\ z_1^{1N} & z_2^{1N} & \dots & z_i^{1N} & \dots & z_n^{1N} & z_1^{1N} z_2^{1N} & z_1^{1N} z_3^{1N} & \dots & z_{i_1}^{1N} z_{i_2}^{1N} & \dots & z_{n-1}^{1N} z_n^{1N} \end{pmatrix},$$

$$H_j = \begin{pmatrix} z_1^{j1} & z_2^{j1} & \dots & z_i^{j1} & \dots & z_n^{j1} & z_1^{j1} z_2^{j1} & z_1^{j1} z_3^{j1} & \dots & z_{i_1}^{j1} z_{i_2}^{j1} & \dots & z_{n-1}^{j1} z_n^{j1} \\ z_1^{j2} & z_2^{j2} & \dots & z_i^{j2} & \dots & z_n^{j2} & z_1^{j2} z_2^{j2} & z_1^{j2} z_3^{j2} & \dots & z_{i_1}^{j2} z_{i_2}^{j2} & \dots & z_{n-1}^{j2} z_n^{j2} \\ \dots & \dots \\ z_1^{jl} & z_2^{jl} & \dots & z_i^{jl} & \dots & z_n^{jl} & z_1^{jl} z_2^{jl} & z_1^{jl} z_3^{jl} & \dots & z_{i_1}^{jl} z_{i_2}^{jl} & \dots & z_{n-1}^{jl} z_n^{jl} \\ \dots & \dots \\ z_1^{jN} & z_2^{jN} & \dots & z_i^{jN} & \dots & z_n^{jN} & z_1^{jN} z_2^{jN} & z_1^{jN} z_3^{jN} & \dots & z_{i_1}^{jN} z_{i_2}^{jN} & \dots & z_{n-1}^{jN} z_n^{jN} \end{pmatrix},$$

$$H_m = \begin{pmatrix} z_1^{m1} & z_2^{m1} & \dots & z_i^{m1} & \dots & z_n^{m1} & z_1^{m1} z_2^{m1} & z_1^{m1} z_3^{m1} & \dots & z_{i_1}^{m1} z_{i_2}^{m1} & \dots & z_{n-1}^{m1} z_n^{m1} \\ z_1^{m2} & z_2^{m2} & \dots & z_i^{m2} & \dots & z_n^{m2} & z_1^{m2} z_2^{m2} & z_1^{m2} z_3^{m2} & \dots & z_{i_1}^{m2} z_{i_2}^{m2} & \dots & z_{n-1}^{m2} z_n^{m2} \\ \dots & \dots \\ z_1^{ml} & z_2^{ml} & \dots & z_i^{ml} & \dots & z_n^{ml} & z_1^{ml} z_2^{ml} & z_1^{ml} z_3^{ml} & \dots & z_{i_1}^{ml} z_{i_2}^{ml} & \dots & z_{n-1}^{ml} z_n^{ml} \\ \dots & \dots \\ z_1^{mN} & z_2^{mN} & \dots & z_i^{mN} & \dots & z_n^{mN} & z_1^{mN} z_2^{mN} & z_1^{mN} z_3^{mN} & \dots & z_{i_1}^{mN} z_{i_2}^{mN} & \dots & z_{n-1}^{mN} z_n^{mN} \end{pmatrix},$$

вектори

$$D_1 = \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_1^2 \\ \dots \\ d_1^l \\ \dots \\ d_1^N \end{pmatrix}, \dots, D_j = \begin{pmatrix} d_j^1 \\ d_j^2 \\ \dots \\ d_j^l \\ \dots \\ d_j^N \end{pmatrix}, \dots, D_m = \begin{pmatrix} d_m^1 \\ d_m^2 \\ \dots \\ d_m^l \\ \dots \\ d_m^N \end{pmatrix},$$

а також вектори

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \dots \\ a_i^1 \\ \dots \\ a_n^1 \\ a_{12}^1 \\ a_{13}^1 \\ \dots \\ a_{i i_2}^1 \\ \dots \\ a_{n-1n}^1 \end{pmatrix}, \dots, A_j = \begin{pmatrix} a_1^j \\ a_2^j \\ \dots \\ a_i^j \\ \dots \\ a_n^j \\ a_{12}^j \\ a_{13}^j \\ \dots \\ a_{i i_2}^j \\ \dots \\ a_{n-1n}^j \end{pmatrix}, \dots, A_m = \begin{pmatrix} a_1^m \\ a_2^m \\ \dots \\ a_i^m \\ \dots \\ a_n^m \\ a_{12}^m \\ a_{13}^m \\ \dots \\ a_{i i_2}^m \\ \dots \\ a_{n-1n}^m \end{pmatrix}.$$

Нарешті, введемо модель

$$y_j^l = a_1^j \cdot z_1^{jl} + a_2^j \cdot z_2^{jl} + \dots + a_i^j \cdot z_i^{jl} + \dots + a_n^j \cdot z_n^{jl} + a_{12}^j z_1^{jl} z_2^{jl} + \dots + a_{13}^j z_1^{jl} z_3^{jl} + \dots + a_{i i_2}^j z_i^{jl} z_{i_2}^{jl} + \dots + a_{n-1n}^j z_{n-1}^{jl} z_n^{jl} = \sum_{i=1}^n a_i^j z_i^{jl} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j z_{i_1}^{jl} z_{i_2}^{jl}, \quad (2.31)$$

що задає ступінь доцільності використання j -го варіанта поливу в l -ій ситуації, $j = \overline{1, m}$.

Невідомі коефіцієнти рівняння регресії (2.31) визначимо методом найменших квадратів шляхом незалежної мінімізації функціоналів

$$I_1 = \left(\begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_1^2 \\ \dots \\ y_1^l \\ \dots \\ y_1^N \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_1^2 \\ \dots \\ d_1^l \\ \dots \\ d_1^N \end{pmatrix} \right)^T \left(\begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_1^2 \\ \dots \\ y_1^l \\ \dots \\ y_1^N \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_1^2 \\ \dots \\ d_1^l \\ \dots \\ d_1^N \end{pmatrix} \right) = (Y_1 - D_1)^T (Y_1 - D_1) =$$

$$= (H_1 A_1 - D_1)^T (H_1 A_1 - D_1),$$

$$I_j = (Y_j - D_j)^T (Y_j - D_j) = (H_j A_j - D_j)^T (H_j A_j - D_j),$$

.....

$$I_m = (Y_m - D_m)^T (Y_m - D_m) = (H_m A_m - D_m)^T (H_m A_m - D_m).$$

У результаті мінімізації цих функціоналів за векторами $A_1, \dots, A_j, \dots, A_m$ відповідно отримаємо m векторів-оцінок параметрів рівнянь (2.31)

$$\hat{A}_j = (H_j^T H_j)^{-1} H_j^T D_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.32)$$

Цей результат дозволяє розрахувати набір значень ступеня доцільності використання кожного з варіантів поливу для будь-якого набору значень контрольованих змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Для цього потрібно набору X поставити у відповідність m векторів $z_j = (z_1^j, z_2^j, \dots, z_n^j)$, $j = \overline{1, m}$. Послідовна підстановка елементів цих векторів і елементів відповідних векторів A_j в рівняння (2.31) визначають шуканий набір значень

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_i^j z_i^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j z_{i_1}^j z_{i_2}^j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.33)$$

Зрозуміло, що успішна реалізація запропонованої технології може бути забезпечена, якщо вдасться, по-перше, розв'язати задачу оцінювання ступеня доцільності використання варіантів поливу для будь-якого набору контрольованих параметрів і, по-друге, побудувати ефективну процедуру розрахунку компонентів векторів $z_j = (z_1^j, z_2^j, \dots, z_n^j)$ для кожного набору значень контрольованих змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Для розв'язання першої з поставлених задач може бути використана описана вище методика складання і розв'язання системи нечітких логічних рівнянь. Найбільш доцільний підхід до розв'язання другої задачі полягає в наступному. Для кожної із змінних x_i

формується набір функцій належності $\mu_j(x_i)$, де $\mu_j(x_i)$ – функція належності контрольованої змінної x_i нечіткій множині M_{ij} значень, сприятливих для реалізації j -го варіанта поливу. Введення сукупності таких функцій належності дозволяє інтерпретувати вимірне значення кожної контрольованої змінної x_i як нечітке число, ступінь належності якого кожній з нечітких множин $M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{im}$ визначається відповідними значеннями $\mu_j(x_i)$ функцій належності. Тоді обчислені відповідно до формули (2.33) числа $y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m$ визначають нечіткі значення ступеня доцільності використання відповідних варіантів поливу для набору вимірних значень контрольованих змінних.

Поставимо тепер завдання визначення функцій належності нечітких чисел \hat{y}_j , $j = \overline{1, m}$. Зрозуміло, що вид шуканих функцій належності залежить від того, яким чином задані функції належності $\mu_j(x_i)$, $i = \overline{1, n}$. Припустимо, наприклад, кожна з цих функцій є функцією $(L-R)$ – типу [79], яка має вигляд

$$\mu(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & x \leq a \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & x > a \end{cases},$$

де L і R є довільними функціями, що не зростають на безлічі невід’ємних дійсних чисел, $\alpha > 0$, $\beta > 0$. При цьому параметр a задає моду нечіткого числа x , а параметри α і β є відповідно лівим і правим коефіцієнтами нечіткості. З цього виходить, що нечітке число $(L-R)$ -типу при фіксованих L і R функціях однозначно визначається трійкою параметрів (a, α, β) . Відповідне нечітке число позначається таким чином: $B_{LR} = \langle a, \alpha, \beta \rangle$.

Тоді дзвіноподібна функція належності (2.8) в термінах $(L - R)$ -функцій буде формалізована співвідношенням

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left(\frac{b-x}{c}\right)^2}, & x \leq b \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, & x > b \end{cases}, \quad (2.34)$$

а формальне позначення відповідного нечіткого числа матиме вигляд

$$X_{LR} = \langle b, c, c \rangle. \quad (2.35)$$

Зручність використання моделей $(L - R)$ -типу для формалізації функцій належності нечітких чисел визначається простотою виконання операцій алгебри над відповідними нечіткими числами [79], які реалізуються таким чином.

Результатом додавання двох нечітких чисел $U_{LR} = \langle a_u, \alpha_u, \beta_u \rangle$ і $V_{LR} = \langle a_v, \alpha_v, \beta_v \rangle$ є число $(L - R)$ -типу, причому $a_w = a_u + a_v$, $\alpha_w = \alpha_u + \alpha_v$, $\beta_w = \beta_u + \beta_v$.

Результатом добутку нечіткого числа $U_{LR} = \langle a_u, \alpha_u, \beta_u \rangle$ на позитивну константу c є число $(L - R)$ -типу, причому $a_w = a_u c$, $\alpha_w = \alpha_u c$, $\beta_w = \beta_u c$.

Результатом добутку нечіткого числа $U_{LR} = \langle a_u, \alpha_u, \beta_u \rangle$ на негативну константу c є нечітке число $(L - R)$ -типу, причому $a_w = ca_u$, $\alpha_w = -\alpha_u c$, $\beta_w = -c\beta_u$.

Результатом добутку двох нечітких чисел з позитивними носіями $U_{LR} = \langle a_u, \alpha_u, \beta_u \rangle$ і $V_{LR} = \langle a_v, \alpha_v, \beta_v \rangle$ є число $(L - R)$ -типу, причому $a_w = a_u a_v$, $\alpha_w = a_u \alpha_v + a_v \alpha_u$, $\beta_w = a_u \beta_v + a_v \beta_u$.

Наведені правила можуть бути використані для отримання функцій належності нечітких чисел $\hat{y}_j, j = \overline{1, m}$, які використовуються відповідно до формули (2.33).

Застосуємо описані правила виконання операцій над нечіткими числами.

Припустимо, що функція належності контрольованого параметра x_i нечіткій безлічі значень, сприятливих для реалізації j -го варіанта, описується функцією $(L - R)$ -типу

$$\mu_j(x_i) = \begin{cases} L \left(\frac{0^j - x_i - x_i}{\alpha_{ij}} \right), \\ R \left(\frac{x_i - x_i - 0^j}{\beta_{ij}^j} \right). \end{cases}$$

Тоді функція належності нечіткого числа $u_{ij} = a_i^j x_i$ має вигляд

$$\mu_j(u_{ij}) = \begin{cases} L \left(\frac{a_i^j 0^j - u_{ij}}{a_i^j \alpha_{ij}} \right), \\ R \left(\frac{u_{ij} - a_i^j 0^j}{a_i^j \beta_{ij}} \right), \end{cases}$$

а функція належності нечіткого числа $u_j = \sum_{i=1}^n u_{ij}$ визначається за формулою

$$\mu_j(u_j) = \begin{cases} L \left(\frac{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j 0^j - u_j}{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j \alpha_{ij}} \right), \\ R \left(\frac{u_j - \sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j 0^j}{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j \beta_{ij}} \right). \end{cases}$$

Далі функція належності нечіткого числа $v_{i_1 i_2} = x_{i_1}^j x_{i_2}^j$ має вигляд

$$\mu_j(v_{i_1 i_2}) = \begin{cases} L \left(\frac{x_{i_1}^{j0} x_{i_2}^{j0} - v_{i_1 i_2}}{x_{i_1}^{j0} \alpha_{i_2 j} + x_{i_2}^{j0} \alpha_{i_1 j}} \right), \\ R \left(\frac{v_{i_1 i_2} - x_{i_1}^{j0} x_{i_2}^{j0}}{x_{i_1}^{j0} \beta_{i_2 j} + x_{i_2}^{j0} \beta_{i_1 j}} \right). \end{cases}$$

Функція належності нечіткого числа $w_{i_1 i_2 j} = a_{i_1 i_2}^j v_{i_1 i_2}$ має вигляд

$$\mu_j(w_{i_1 i_2 j}) = \begin{cases} L \left(\frac{a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^{j0} x_{i_2}^{j0} - w_{i_1 i_2 j}}{a_{i_1 i_2}^j (x_{i_1}^{j0} \alpha_{i_2 j} + x_{i_2}^{j0} \alpha_{i_1 j})} \right), \\ R \left(\frac{w_{i_1 i_2 j} - a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^{j0} x_{i_2}^{j0}}{a_{i_1 i_2}^j (x_{i_1}^{j0} \beta_{i_2 j} + x_{i_2}^{j0} \beta_{i_1 j})} \right), \end{cases}$$

а функція належності нечіткого числа $w_j = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n w_{i_1 i_2 j}$ визначається виразом

$$\mu_j(w_j) = \begin{cases} L \left(\frac{\sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n \hat{a}_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^{j0} x_{i_2}^{j0} - w_j}{\sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n \hat{a}_{i_1 i_2}^j (x_{i_1}^{j0} \alpha_{i_2 j} + x_{i_2}^{j0} \alpha_{i_1 j})} \right), \\ R \left(\frac{w_j - \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n \hat{a}_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^{j0} x_{i_2}^{j0}}{\sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n \hat{a}_{i_1 i_2}^j (x_{i_1}^{j0} \beta_{i_2 j} + x_{i_2}^{j0} \beta_{i_1 j})} \right). \end{cases}$$

Нарешті, функція належності нечіткого числа $y_j = u_j + w_j$ розраховується за формулою

$$\mu_j(y_j) = \begin{cases} L \left(\frac{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j x_i^j + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum \hat{a}_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^j x_{i_2}^j - y_j}{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j \alpha_{ij} + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum \hat{a}_{i_1 i_2}^j \left(x_{i_1}^j \alpha_{i_2 j} + x_{i_2}^j \alpha_{i_1 j} \right)} \right), \\ R \left(\frac{y_j - \left(\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j x_i^j + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum \hat{a}_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^j x_{i_2}^j \right)}{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i^j \beta_{ij} + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum \hat{a}_{i_1 i_2}^j \left(x_{i_1}^j \beta_{i_2 j} + x_{i_2}^j \beta_{i_1 j} \right)} \right). \end{cases} \quad (2.36)$$

Припустимо, що в певній ситуації прийняття рішення отриманий вектор контрольованих змінних $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$. Тоді з використанням співвідношення (2.36) можна розрахувати ступінь доцільності використання кожного з можливих варіантів поливу. Відповідне число для j -го варіанта поливу дорівнює

$$\mu_j(X^*) = \begin{cases} L \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^j + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^j x_{i_2}^j - \left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^* + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^* x_{i_2}^* \right)}{\sum_{i=1}^n a_i^j \alpha_{ij} + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum a_{i_1 i_2}^j \left(x_{i_1}^j \alpha_{i_2 j} + x_{i_2}^j \alpha_{i_1 j} \right)} \right), \\ R \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^* + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^* x_{i_2}^* \right) - \left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^j + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^j x_{i_2}^j \right)}{\sum_{i=1}^n a_i^j \beta_{ij} + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \sum a_{i_1 i_2}^j \left(x_{i_1}^j \beta_{i_2 j} + x_{i_2}^j \beta_{i_1 j} \right)} \right), \end{cases} \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.37)$$

Порівняння цих чисел для різних варіантів поливу дозволяє вибрати той з них, ступінь доцільності якого за ситуації, коли набір контрольованих параметрів утворює вектор X^* , є найбільшим. Слід зазначити, що розмірність

завдання оцінювання параметрів рівняння регресії достатньо велика. Число оцінюваних коефіцієнтів дорівнює $R = \frac{n(n+1)}{2}$. Зниження розмірності завдання досягається при використанні ієрархії станів. При цьому формується набір укрупнених параметрів станів (u_1, u_2, \dots, u_d) . Чисельне значення кожного з цих параметрів визначається значеннями деякої підмножини безлічі всіх контрольованих змінних. Формальний опис завдання при цьому має вигляд

$$y_j = \sum_{s=1}^d b_s^j u_s + \sum_{s_1=1}^d \sum_{s_2 \neq s_1}^d b_{s_1 s_2}^j u_{s_1 s_2}, \quad j = \overline{1, m},$$

$$u_s = \sum_{i \in N_s} q_i x_i + \sum_{i_1 \in N_s} \sum_{i_2 \neq i_1} q_{i_1 i_2} x_{i_1} x_{i_2}, \quad s = \overline{1, d},$$

де N_s – підмножина змінних, використовуваних для розрахунку s -го укрупненого параметра.

Запропонована методика має ряд важливих переваг. По-перше, вона дозволяє розрахувати ступені доцільності використання варіантів поливу для будь-якого набору контрольованих параметрів. По-друге, вона забезпечує можливість обліку відмінностей у важливості контрольованих параметрів. По-третє, після проведення попереднього навчання реалізація методики не вимагає зберігання громіздкої багатовимірної бази знань. Нарешті, по-четверте, методика дає можливість при розрахунку ступеня доцільності варіантів поливу враховувати не тільки значення факторів, що впливають на прийняття рішень, але і їх взаємодію необхідного порядку.

Висновки за розділом 2

1. Розглянуто основні поняття теорії нечітких множин і сформульовано основні принципи діагностування параметрів режимів зрошення на базі нечіткої логіки.

2. Розглянуто певні фактори, що впливають на визначення параметрів режиму зрошення, і можливі діагнози проведення поливів як

лінгвістичні змінні. Описано найбільш застосовувані параметричні моделі функцій належності і вибрано для моделі діагностування найбільш зручну, дзвіноподібну модель функції належності.

3. Показано, що бази нечітких знань є можливим засобом формалізації причинно-наслідкових зав'язків «входи – вихід» об'єкта моделювання на природній мові за допомогою нечітких логічних висловлювань, які поєднують вхідні й вихідні параметри, представлені у вигляді лінгвістичних змінних з нечіткими термами.

4. Представлено загальну методику моделювання залежності «багато входів – один вихід» базами нечітких знань, яку реалізовано наведеним алгоритмом, що здійснюється через нечіткий логічний висновок. Представлено загальну архітектуру системи нечіткого логічного висновку, яка є частиною автоматизованої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень з визначення параметрів режимів зрошення.

5. Проведено аналіз недоліків традиційної технології формування діагнозів проведення поливів на основі багатовимірної бази знань. Запропоновано методику оцінювання ступеня доцільності відшукування варіантів поливу з використанням математичного апарату нечітких регресій.

РОЗДІЛ 3

НЕЧІТКА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ЗРОШУВАНОВОГО ПОЛЯ

3.1. Фактори впливу на діагностику поливу та типи діагнозів

Відомо, що режим зрошення повинен відповідати потребі культури у воді у всі періоди її розвитку. При формуванні режиму зрошення враховуються наступні основні фактори: біологічні особливості культур і їх реагування на інтенсивність водозабезпеченості протягом вегетації, потреба рослин у воді для формування високого рівня врожаю (сумарне водоспоживання), глибина проникнення і розподіл кореневої системи по профілю ґрунту, фізичні властивості і механічний склад ґрунту, глибина залягання ґрунтових вод, клімат зони, погодні умови вегетаційного періоду та інші.

Визначення певного варіанта поливу можливе тільки за умов комплексного розгляду часткових факторів, які вибрані у кількості 19 та пов'язані між собою причинно-наслідковими зв'язками на різних рівнях ієрархії.

3.1.1. Вологозабезпеченість рослин

Вологозабезпеченість рослин є одним із визначальних показників необхідності поливу, що безпосередньо визначається такими факторами, як концентрація клітинного соку, тургор листів, плач зрізаної рослини, опади за поточний період, рівень ґрунтових вод та рівень забезпеченості ґрунтовою вологою, що залежить ще від низки факторів.

На вологозабезпеченість рослин і величину поливної норми також впливає положення рівня ґрунтових вод. Близьке залягання ґрунтових вод на глибині 1,3 – 3 м забезпечує суттєве підживлення рослин і є істотною складовою при визначенні водонадходження. Отже, в цьому випадку величину поливної норми необхідно зменшувати пропорційно глибині їх залягання, і при зниженні рівня до 0,8 м проведення поливу стає взагалі недоцільним.

Визначення строку поливу за зовнішніми ознаками використовують в основному практики зрошуваного землеробства. Основними критеріями для призначення строку поливу є такі: втрата тургору листів, переміщення вузла цвітіння до точки росту, зміна у фарбуванні листя [100]. Другий і третій із перелічених критеріїв можуть використовувати тільки досить досвідчені експерти, а найбільш простим є тургор листів.

За ослабленням тургору в частинах рослин, що розвиваються, визначають момент, коли необхідно починати полив. Тобто оводненість листів характеризується відносною тургесцентністю. Зовнішній тургорний тиск проявляється як пружність елементів рослини й, зокрема, як пружність устячних клітинок, що обумовлюють нормальне керування транспірацією. Крім сталих характеристик тургору, на практиці часто використовуються і його якісні оцінки – в'янення рослин. Незалежно від ступеня в'янення поява порушення тургору в періоди максимуму радіаційного балансу може розглядатися як сигнал про потребу рослини у волозі. Полив за цією ознакою дозволяє попередити факт настання стійкого в'янення, що свідчить про хронічний дефіцит вологи. Цей метод застосовують у польових умовах, він досить простий і не вимагає технічного забезпечення.

Для фізіологічного обґрунтування режимів поливу в практиці за різних часів використовувались наступні показники: вміст води в листах, ступінь відкритості устячок, транспірація, осмотичний тиск клітинного соку, температурний градієнт листя – повітря, всмоктувальна сила листів, концентрація клітинного соку, виділення пасоки з пенька зрізаної рослини (плач), величина електричного опору [100].

Кожний із цих показників має свої переваги й недоліки, але найбільш надійним показником є концентрація клітинного соку, а найпростішим – плач зрізаної рослини.

Вологозабезпеченість рослин адекватно характеризує концентрація клітинного соку (ККС) листів. Якщо рослина підтримує рівень транспірації в умовах недостатнього водопостачання, то після закінчення деякого часу

порушення водного балансу листа призведе до зміни концентрації клітинного соку. Така зміна концентрації з'являється через те, що, незважаючи на недолік припливу води, величина транспірації не змінюється, оскільки площа випару зберігається досить великою і практично незмінною, поки через зменшення тургорного тиску або інших факторів не почнуть закриватися устячка. Зміна концентрації клітинного соку й відповідна зміна осмотичного тиску води в листі викликають збільшення сисної сили і у кінцевому підсумку сприяє надходженню води через кореневу систему. Критичні величини ККС, що відповідають критичній вологості, при якій починається пригнічування росту й зниження врожаю для різних рослин, відрізняються й залежать від фаз вегетації, часу й місця відбору індикаторної проби.

Концентрація клітинного соку визначається за допомогою рефрактометра як оптична активність віджатого соку (коефіцієнт переломлення світла).

Виділення пасоки з пенька зрізаної рослини відбувається при досить високій вологості ґрунту, а усмоктування води із приладу – в умовах недостатньої вологи. Результати вивчення плачу рослин виявилися дуже корисними для обґрунтування критичної вологості ґрунту, нижче якої пригнічується ріст рослин і знижується їхня продуктивність, – це момент припинення плачу рослин. За нормальних умов зволоження ґрунту момент припинення плачу (зміна позитивного плачу на негативний) при зрізанні рослин у вечірні години збігається зі зниженням вологості кореневмісного (розрахункового) шару ґрунту до 70 % від ППВ. Однак за певних умов момент припинення плачу зміщується у бік найбільш низької або більш високої вологості ґрунту, у зв'язку із чим змінюється й критична вологість ґрунту. Таким чином, пояснюються факти, коли називаються різні рівні критичної вологості ґрунту для однакових культур, часто навіть на однакових ґрунтах, – від 60 до 80 % від ППВ.

3.1.2. Кліматичний фактор

Багаторічними дослідженнями встановлено, що в посушливі роки, які характеризуються високими температурами і низькою вологістю повітря, суховіями і незначною кількістю опадів, сумарне водоспоживання максимальне, а у вологі роки, навпаки, мінімальне. У роки з прохолодною погодою, частими опадами і високою вологістю повітря поливи можна призначати при вологості на 5 – 10 % нижче оптимальної для заданого типу ґрунту. Навпаки, в екстремальні роки, які характеризуються високими температурами, низькою відносною вологістю повітря і суховіями, величина передполивної вологості ґрунту повинна перевищувати оптимальну нижню межу на 5 – 10 % НВ. Незважаючи на те, що основний фактор, який визначає стан водного режиму рослин, – вологість ґрунту, критична вологість залежить від напруженості погодних умов, насамперед вологості й температури повітря.

Температура повітря безпосередньо впливає на визначення сумарної випаровуваності, від якої залежить водний дефіцит рослин. Висока температура (більше 32 – 35 °С) разом із низькою відносною вологістю повітря (нижче 30%) може бути причиною гострого водного дефіциту в рослинній тканині культури. Установлено, що чим вище температура повітря й нижче вологість ґрунту, тим більше витрачається води на транспірацію і на вільне випаровування і відповідно тим частіше, але меншими нормами необхідно робити полив.

Вологість повітря тісно пов'язана з таким фактором, як температура, і хоча пряма залежність між ними не завжди існує, в сукупності ці фактори відіграють значну роль при формуванні режимів зрошення. Дуже часто під час тривалої атмосферній посухи, коли відносна вологість повітря стійко підтримується нижче 45%, короточасні порушення водного режиму рослин можуть спостерігатися навіть при повному насиченні ґрунту вологою. Щоб відокремлювати різні стани повітряної посухи, практики зрошувального землеробства використовують наступну шкалу вологості повітря: висока вологість повітря – 85%, середня вологість повітря – 65%, низька відносна

вологість – 45%. Визначення вологості повітря здійснюють психрометрами та гігрометрами різного типу. За відсутності у господарстві метеопосту значення кліматичних факторів отримують на найближчій метеостанції.

3.1.3. Рівень забезпеченості ґрунтовою вологою

Рівень забезпеченості ґрунтовою вологою визначається такими факторами, як вологість ґрунту, фаза вегетації та механічний склад ґрунту.

Основний показник, що визначає рівень забезпеченості ґрунтовою вологою та від якого залежить вибір рішення щодо необхідності поливу, – це вологість ґрунту. Чим вона вище, тим менша необхідність у зрошенні і відповідно поливна норма та навпаки. Отже, чим менше відхиляється вологість ґрунту від оптимальної, тим більше задовольняється потреба рослин у воді. Строк проведення поливу визначається за датою зниження запасів вологи у ґрунті до мінімально допустимих. Передполивна вологість ґрунту, різного за механічним складом, для різних рослин та у різні фази вегетації змінюється у досить широкому діапазоні: від 60 – 65% НВ до 75 – 85% НВ. Поливи призначають на той день, коли вологість ґрунту знизиться до мінімальної. Для визначення вологості ґрунту використовуються методи, описані у першому розділі.

У різні фази розвитку рослин потреба їх у воді змінюється, що зумовлено фізіологічними процесами і пов'язаною з цим зміною глибини розповсюдження коренів. Для різних культур і в роки різної вологозабезпеченості дати фаз розвитку (табл. 3.1) не є постійними і можна говорити лише про середні дати, що свідчить про неможливість призначення поливів за заздалегідь наміченою схемою поливу. Але різні за фазами показники передполивної вологості ґрунту свідчать про необхідність урахування цього параметра при визначенні строків та норм поливу.

Фази розвитку рослин

Культура	Середні фази розвитку	Середні дати
Помідори розсадні	Висадка розсади – цвітіння	20.05 – 5.06
	Цвітіння – зав'язування плодів	6.06 – 20.07
	Дозрівання – збір плодів	21.07 – 29.09
Цибуля ріпчаста	Сходи – початок утворення цибулин	10.04 – 7.06
	Початок утворення цибулин – масове досягання	8.06 – 22.08
Огірки	Сходи – початок масової появи жіночих квіток	19.05 – 1.07
	Початок масової появи жіночих квіток – кінець плодоношення	2.07 – 8.09
Картопля	Сходи – початок цвітіння	10.05 – 15.06
	Цвітіння – призупинення росту гички	16.06 – 20.07
	Призупинення росту – початок в'янення гички	11.07 – 10.08
Капуста пізньостигла	Масові сходи – зав'язування голівки	26.05 – 27.07
	Зав'язування голівки – початок дозрівання качана	28.07 – 16.09
	Початок дозрівання – масове дозрівання	17.09 – 26.10
Баклажани	Висадка розсади – цвітіння	28.05 – 7.07
	Цвітіння – перший збір	8.07 – 29.07
	Перший збір – останній збір	30.07 – 5.10
Перець солодкий	Висадка розсади – цвітіння	29.05 – 5.07
	Цвітіння – перший збір	6.07 – 31.07
	Перший збір – останній збір	1.08 – 5.10

Мінеральна частина ґрунту складається із часточок різної величини. Вміст таких часток у материнській породі й ґрунті називають їхнім механічним складом. Для класифікації ґрунтів за механічним складом усі ґрунтові фракції ділять на дві частини: частки крупніше 0,01 мм називають фізичним піском, а частки дрібніше 0,01 мм – фізичною глиною. За цією ознакою проведено наступну класифікацію ґрунтів за механічним складом:

зв'язний і пухкий пісок, легкий, середній і важкий суглинок, легка, середня й важка глина [23, 71].

До легких ґрунтів відносять супіщані, легкосуглинкові й частково середньосуглинкові, до важких – середньосуглинкові, важкосуглинкові й глинясті.

Чим важче ґрунт, тим більший відсоток води недоступний для рослини й тим менше повітря в ґрунті залишається після поливу. Тому найцінніші у виробничому відношенні легкосуглинкові й середньосуглинкові ґрунти. У них створюється сприятливий водний режим. Піщані ґрунти володіють гарною повітряною проникністю і водопроникністю, але водний режим їх нестійкий. Важкий глинястий ґрунт погано пропускає воду й повітря, слабо прогрівається.

3.1.4. Найменша вологоємність

Для розрахунку поливної норми разом з іншими показниками необхідно знати найменшу вологоємність, що характеризує водоутримуючу здатність ґрунту і визначається кількістю води, яку ґрунт може утримати після стоку. Найменша вологоємність ґрунту (НВ) – це такий зменшений уміст вологи, коли у ґрунті немає води, що вільно пересувається.

Величина найменшої вологоємності залежить від типу ґрунту, його механічного, мінералогічного складу, щільності, структурності (табл. 3.2).

Структура ґрунтів – найважливіша морфологічна ознака. Під нею розуміють макроагрегатну будову твердої фази ґрунту. Структурність характеризує здатність ґрунту розпадатися на агрегати, а сукупність агрегатів різної величини, форми й якісного складу називається ґрунтовою структурою.

У піщаних і супіщаних ґрунтах механічні елементи звичайно перебувають у роздільно-частинному стані. Суглинні й глинясті ґрунти можуть бути структурними й безструктурними, або малоструктурними. Якісна оцінка структурності визначається її розміром, пористістю й водоміцністю. Найбільш агрономічно цінними є макроагрегати розміром 0,25 – 10 мм, що

володіють високою пористістю (> 45%), механічною міцністю й водоміцністю [23].

Таблиця 3.2

Водно-фізичні властивості метрового шару ґрунту в зонах зрошення України

Тип і різновидність ґрунту	Механічний склад	Щільність ґрунту, т/м ³	Вологоємність найменша, %
Дерново-підзолистий	супіщаний	1,61	11,2
Світло-сірий лісовий	супіщаний	1,58	11,8
	легкосуглинковий	1,44	18,5
Сірий лісовий	супіщаний	1,54	13,8
Темно-сірий лісовий	супіщаний	1,59	15,2
	легкосуглинковий	1,4	21,3
	середньосуглинковий	1,3	24
Чорнозем опідзолений	легкосуглинковий	1,36	21,2
	середньосуглинковий	1,3	22,4
	важкосуглинковий	1,28	26,2
Чорнозем південний	легкосуглинковий	1,3	22,1
	середньосуглинковий	1,2	23,6
	важкосуглинковий	1,1	24,5
Чорнозем звичайний	середньосуглинковий	1,3	22,3
	важкосуглинковий	1,28	26,9
	легкоглинястий	1,2	27,5
	глинястий	1,16	29,3
Чорнозем потужний	легкосуглинковий	1,38	25,4
	середньосуглинковий	1,26	26
	важкосуглинковий	1,12	27,3
Каштанові	середньосуглинковий	1,38	20
	важкосуглинковий	1,23	22,5
	легкоглинястий	1,19	25,4
	глинястий	1,1	27,1

Структурні ґрунти завдяки наявності некапілярних пор добре вбирають вологу. У такому ґрунті втрати води від поверхневого стоку незначні, отже, у

структурному ґрунті створюються сприятливі умови для забезпечення рослин вологою й повітрям.

Безструктурним ґрунтом вода поглинається повільно, значна частина її може губитися внаслідок поверхневого стоку. Суцільний капілярний зв'язок у товщі ґрунту сприяє більшій втраті вологи від випару. У такому ґрунті нерідко спостерігаються два крайніх стани: надлишкове або недостатнє зволоження.

Кількісне оцінювання структурного стану ґрунту виконується за методами сухого та мокрого просіювання на основі вивчення динаміки наступних показників: коефіцієнта структурності, суми водостійких та агрономічно цінних агрегатів.

Класифікацію ґрунтів проводять за їх генезисом, виділяючи наступні основні генетичні типи: чорнозем, підзол, сірі лісні, буроземи, каштанові. Типи ґрунту поділяють на підтипи залежно від ґрунтово-кліматичних умов формування, виділяючи «основний» підтип, для якого використовують назви «типовий», або «звичайний», та «перехідні» підтипи з тими чи іншими ознаками, що відрізняють їх від «основного». За такою класифікацією в Україні визначено близько 600 видів ґрунтів. Основні типи зрошуваних ґрунтів за 6-ма ґрунтово-кліматичними зонами України представлено на рис. 3.1.

Щільність ґрунту дає уявлення про загальний обсяг пор і дозволяє судити про обсяг води й повітря в ґрунті, її величина необхідна для розрахунку запасів води в шарі ґрунту і визначення поливної норми.

Щільність ґрунту – маса абсолютно сухого ґрунту в одиниці об'єму непорушеної будови. Щільність ґрунтів змінюється в широких межах: у мінеральних – від 0,9 до 1,8 г/см³ (табл. 3.2), у болотних торф'яних – від 0,15 до 0,4 г/см³.

На величину щільності впливають механічний склад, структурність, мінералогічний склад, складність й зміст органічної речовини [91]. На щільність верхнього шару ґрунту також великий вплив має обробіток: починаючи з весняного періоду до кінця вегетації щільність поступово збільшується. Ці обставини також необхідно враховувати при визначенні поливної норми.

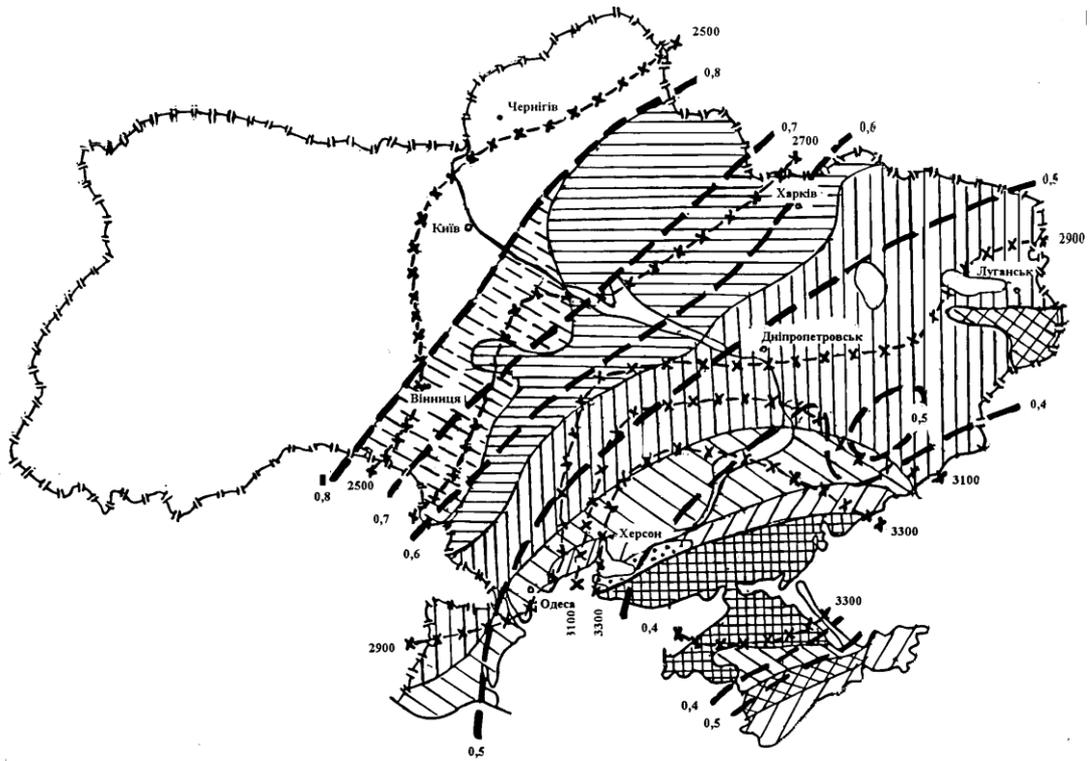


Рис. 3.1. Основні типи зрошуваних ґрунтів України

Умовні позначення:

-  - чорноземи типові мало та середньогумусні;
-  - чорноземи звичайні мало та середньогумусні;
-  - чорноземно супіщані ґрунти;
-  - піски;
-  - чорноземи південні важкосуглинкові та глинисті;
-  - чорноземи південні солонцюваті;
-  - чорноземи на твердих карбонатних та безкарбонатних породах;
-  - темно-каштанові ґрунти в комплексі з солонцями;
-  - темно-сірі та опідзолені ґрунти;
-  - коефіцієнти природного зволоження;
-  - сума середньодобових температур повітря $>10^{\circ}\text{C}$.

При розрахунку величини поливної норми слід мати на увазі, що навіть невеликі зміни у значенні щільності приводять до значних змін запасів води у ґрунті.

3.1.5. Необхідність поливу

Для прийняття рішення щодо визначення строків та норм поливу велику роль відіграє такий узагальнений фактор, як «Необхідність поливу», що в свою чергу залежить від таких факторів, як вологозабезпеченість рослини, кліматичний фактор, критичні фази, режими зрошення.

Поливи зазвичай розподіляють таким чином, щоб забезпечити рослини вологою у так звані критичні періоди, коли вони найбільш чутливі до підсушування ґрунту. Період, коли зниження рівня вологозабезпеченості рослин різко порушує всі процеси їх життєдіяльності і призводить до значного зниження врожаю, називається критичним. Цей період відрізняється від інших тільки тим, що в цей час рослина особливо чутлива до нестачі вологи у ґрунті і зниження врожаю за цими причинами бувають особливо значними.

У критичні фази розвитку рослин їх вологозабезпеченість за різних режимів зрошення не повинна бути меншою за критичну, тому передполивні значення вологості ґрунту слід підтримувати у межах оптимальних показників: 75 – 95% НВ для важкосуглинкових ґрунтів, 65 – 75% НВ для середньосуглинкових і 60 – 65% НВ для легкосуглинкових. При водозберігаючих режимах зрошення у некритичних періодах розвитку рослин існує можливість зменшення зрошувальної норми шляхом зниження передполивної вологості ґрунту на 10 – 20% НВ, що не призводить до суттєвого зниження врожаю.

Критичні періоди необхідно враховувати при управлінні поливними режимами культур. Тому за потреби у поливах кількох культур одночасно перевагу слід віддавати тим з них, у яких підійшов критичний період. Для кожної культури існують свої критичні періоди, коли нестача вологи у ґрунті суттєво знижує врожай.

Наведемо критичні періоди для деяких важливих сільськогосподарських культур.

Культури	Критичні періоди
Озимі й ярі колосові	Вихід у трубку – налив зерна
Кукурудза	За 10 днів до викидання – через 10 днів після цвітіння
Сорго, просо	Викидання волотей – налив зерна
Соя	Бутонізація, цвітіння – налив зерна
Соняшник	Створення кошиків – налив насіння
Цукрові і кормові буряки	Період інтенсивного росту листя і коренеплодів
Картопля	Бутонізація – масове бульбоутворення
Томати	Зав'язування і ріст плодів
Капуста	Наростання розетки, досягання качана
Огірки	Плодоносіння

3.1.6. Діагноз поливів

Визначення рішення щодо проведення поливу ґрунтується на розглянутих вище узагальнених показниках необхідності поливу та найменшої вологоємності, але велику роль при цьому відіграє такий частковий показник, як глибина активного шару ґрунту.

При визначенні поливних норм для зволожувальних поливів орієнтуються на потужність активного шару – такого шару ґрунту, в якому зосереджено 95% коренів рослин. Зрошення стає ефективним у випадку, коли при поливі добре зволожується активний кореневмісний шар ґрунту. Потужність такого шару дуже мінлива, що зумовлено як зміною кореневмісної зони за час вегетації, так і різною потужністю кореневих систем для рослин в однаковій фазі вегетації.

Діагностування параметрів режимів зрошення пов'язано з необхідністю правильно і вчасно визначати строки та норми поливу. Коли рослина забезпечена достатньо вологою, необхідно визначити, на який час її вистачить

і коли треба робити наступне діагностування, залежно від кліматичних умов, для проведення поливу певною поливною нормою. При недостатній вологозабезпеченості рослини необхідно визначити, наскільки існує дефіцит вологи і якою нормою треба провести полив. Якщо культура повною мірою забезпечена ґрунтовою вологою, але доволі посушливі кліматичні умови, необхідний освіжальний полив для відновлення процесу росту.

Проведемо класифікацію діагнозів щодо необхідності поливу наступним чином:

- полив не потрібний, наступне діагностування через 6 – 7 днів (d_1);
- полив не потрібний, наступне діагностування через 4 – 5 днів (d_2);
- потрібний освіжальний полив нормою 100 – 150 м³/га (d_3);
- потрібний полив малою поливною нормою 250 – 300 м³/га (d_4);
- потрібний полив малою поливною нормою 300 – 350 м³/га (d_5);
- потрібний полив поливною нормою 350 – 400 м³/га (d_6);
- потрібний полив поливною нормою 400 – 450 м³/га (d_7);
- потрібний полив поливною нормою 450 – 500 м³/га (d_8);
- потрібний полив поливною нормою 500 – 550 м³/га (d_9).

3.2. Ієрархічна класифікація параметрів стану

Використовуючи принцип ієрархічності діагностичних знань, проведемо класифікацію вхідних змінних і побудуємо дерево висновку, що визначає систему вкладених висловлень – знань меншої розмірності (рис 3.2).

На дереві логічного висновку зображені причинно-наслідкові зв'язки між частковими параметрами – термінальними вершинами дерева, що визначають необхідність у зрошенні, узагальненими параметрами – вузлами дерева та діагнозом поливу – коренем дерева.

Побудовано дерево висновку (рис. 3.2), на якому зображені залежності виду:

$$D = f_D(x_{19}, y_4, y_5); \quad (3.1)$$

$$y_1 = f_1(x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, y_3); \quad (3.2)$$

$$y_2 = f_2(x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}); \quad (3.3)$$

$$y_3 = f_3(x_8, x_{13}, x_{14}); \quad (3.4)$$

$$y_4 = f_4(x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}); \quad (3.5)$$

$$y_5 = f_5(x_1, x_2, y_1, y_2), \quad (3.6)$$

де D – вихідна змінна «діагноз поливів»;

y_1, y_2, y_3, y_4 – узагальнені параметри стану:

y_1 – вологозабезпеченість рослини;

y_2 – кліматичний фактор;

y_3 – рівень забезпеченості ґрунтовою вологою;

y_4 – найменша вологоємність;

y_5 – необхідність поливу.

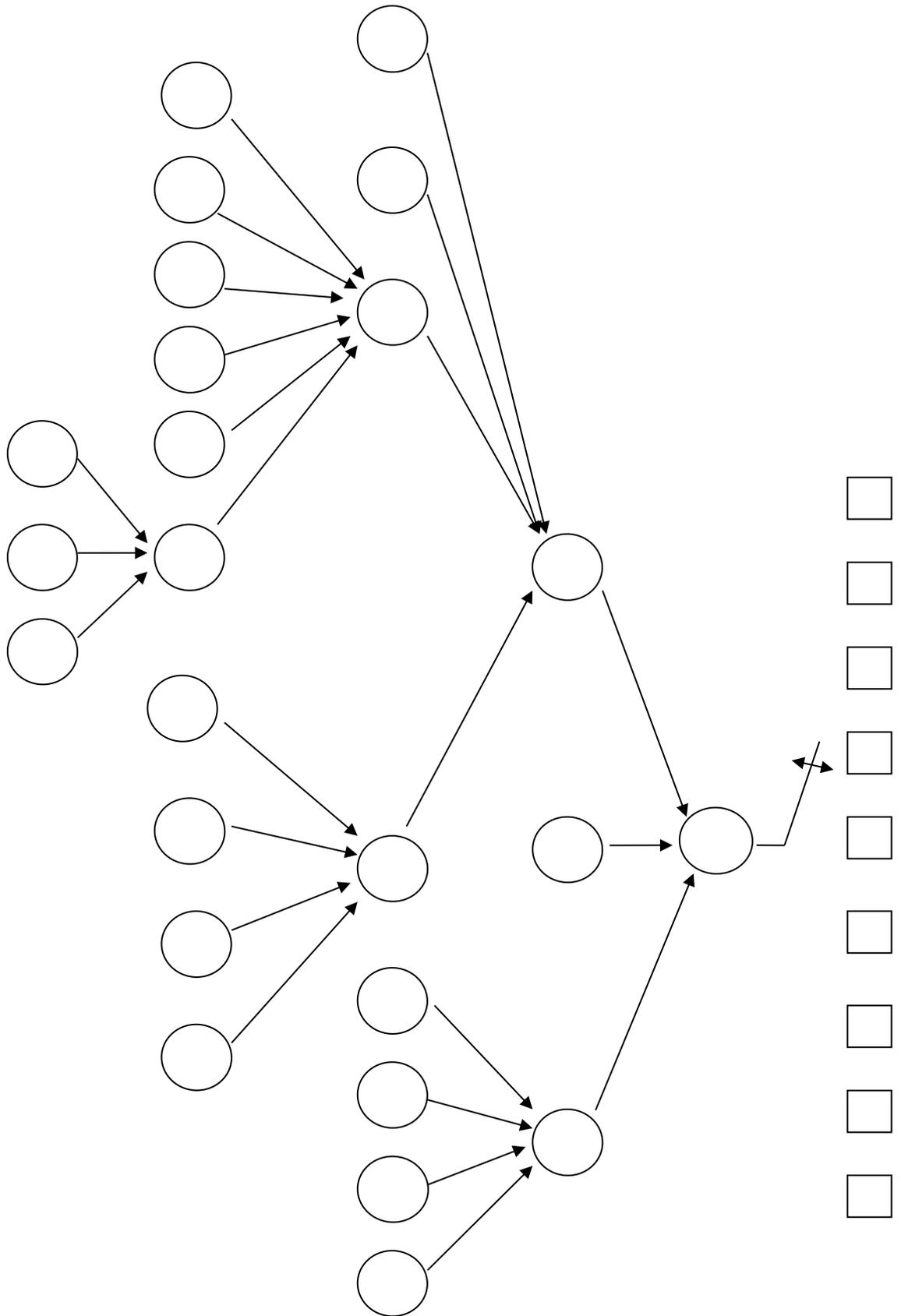


Рис. 3.2. Дерево логічного висновку для діагностування параметрів режимів зрошення

3.3. Параметри стану зрошеного поля як лінгвістичні змінні

Фактори, що впливають на вибір рішення щодо проведення поливу, представлено у вигляді лінгвістичних змінних (табл. 3.3), для яких вибрано універсальні множини та терми. Узагальнені параметри стану зрошеного поля наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.3

Фактори, що впливають на вибір діагнозу поливу, як лінгвістичні змінні

Частковий параметр стану	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки
x_1 – критична фаза	$[0, 1]$, у. о.	некритична (нкp), критична (кp)
x_2 – режим зрошення	$[0, 1]$, у. о.	біологічно-оптимальний (бо), оптимально екологічно безпечний (оeb), водозберігаючий (вз), ґрунтозахисний (гз)
x_3 – рівень ґрунтових вод	$[0, 30]$, м	близько (б), середньо (с), глибоко (г)
x_4 – опади за поточний період	$[0, 100]$, мм	немає (н), незначні (нз), достатні (д), рясні (p)
x_5 – плач	$[0, 1]$, у. о.	негативний (нг), немає (н), позитивний (п)
x_6 – тургор листів	$[0, 1]$, у. о.	ослаблений (ос), середній (сp), нормальний (н)
x_7 – концентрація клітинного соку (ККС)	$[0, 20]$, %	низька (н), нижче за критичну (нкp), критична (кp), вище за критичну (вкp)
x_8 – вологість ґрунту від НВ	$[0, 100]$, %	низька (н), нижче за середню (нс), трохи нижче за середню (тнс), середня (с), трохи вище за середню (твс), вище за середню (вс), висока (в)
x_9 – прогноз опадів	$[0, 100]$, мм	немає (н), незначні (нз), достатні (д), рясні (p)
x_{10} – температура повітря	$[0, 50]$, °Ñ	низька (н), нижче за середню (нс), середня (с), вище за середню (вс), висока (в)
x_{11} – вологість повітря	$[0, 100]$, %	низька (н), середня (с), висока (в)
x_{12} – швидкість вітру	$[0, 15]$, м/с	низька (н), середня (с), висока (в)
x_{13} – склад ґрунту	$[0, 1]$, у. о.	легкі (л), середні (с), важкі (в)
x_{14} – фаза вегетації	$[0, 1]$, у. о.	висадка – цвітіння (вц), цвітіння – зав'язь (цз), дозрівання – збір (дз)

x_{15} – тип ґрунтів	$[0, 1]$, у. о.	дерново-підзолистий (дп), світло-сірий лісовий (ссл), сірий лісовий (сл), темно-сірий лісовий (тсл), чорнозем опідзолений (чоп), чорнозем південний (чпд), чорнозем звичайний (чзв), чорнозем потужний (чпт), каштанові (к)
x_{16} – механічний склад ґрунту	$[0, 1]$, у. о.	супіски (сп), легкі суглинки (лсг), середні суглинки (ссг), важкі суглинки (всг), легкі глини (лг), глини (г)
x_{17} – щільність ґрунту	$[1.1, 1.7]$, т/м ³	низька (н), нижче за середню (нс), середня (с), вище за середню (вс), висока (в)
x_{18} – структурність ґрунту	$[0, 1]$, у. о.	безструктурна (бс), слабо-структурна (сс), агрономічно цінна (ац)
x_{19} – глибина активного шару ґрунту	$[0, 2]$, м	мала (м), середня (с), велика (в)

Таблиця 3.4

Узагальнені параметри стану як лінгвістичні змінні

Узагальнений параметр стану	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки
y_1 – вологозабезпеченість рослини	$[0, 1]$, у. о.	нижче за критичну (нкр), критична (кр), вище за критичну (вкр), висока (в)
y_2 – кліматичний фактор	$[0, 1]$, у. о.	несприятливий сухий (нсс), помірний (пм), сприятливий вологий (спв)
y_3 – рівень забезпеченості ґрунтовою вологою	$[0, 1]$, у. о.	нижче за критичний (нкр), критичний (кр), вище за критичний (вкр), високий (в)
d_6 – найменша вологоємність	$[0, 40]$, %	низька (н), нижче за середню (нс), середня (с), вище за середню (вс), висока (в)
y_2 – необхідність поливу	$[0, 1]$, у. о.	не потрібний полив (нп), освіжаючий полив (осв), малі поливні норми (мпн), нормальні поливні норми (нпн)

3.3.1. Матриці знань щодо визначення необхідності поливу

Вище розглядалося, що при використанні регресійної технології для вибору раціонального варіанта поливу на першому, попередньому етапі здійснюється оцінювання параметрів відповідних рівнянь. При цьому точність отримуваних оцінок принципово залежить від того, наскільки точною є відповідність між значеннями набору контрольованих параметрів і діагнозом поливу, що рекомендується. Зважаючи на особливу важливість цього завдання, розглянемо методику його розв'язання детально.

За експертною інформацією побудовані нечіткі матриці знань (табл. 3.5 – 3.10), що являють собою зв'язок між нечіткими термами вхідних та вихідних змінних відповідно співвідношенням (3.1) – (3.6). Матриці знань відображають досвід експерта у вигляді продукційних правил типу «ЯКЩО – ТОДІ». Лінгвістичні змінні у кожному рядку, як посилки правил, поєднуються логічною операцією «ТА», а рядки матриці знань, що відповідають правилам у базі знань, зв'язуються операцією «АБО». Змінні, значення яких не впливають на висновок правила, позначаються знаком «-». Із максимальної кількості правил, що дорівнює 2892, у запропонованих матрицях знань представлено 217 найбільш вагомих, при цьому зменшення їх кількості зумовлено також використанням правил у неповному форматі.

Експертні правила з матриць знань склалися на основі пропозицій експертів Інституту гідротехніки і меліорації (ІГіМ), м. Київ, та за літературними джерелами, серед яких: при побудові матриці знань (табл. 3.5), що відповідає співвідношенню (3.1), використовувалася інформація з джерел [17, 26, 32, 42, 64]; матриці знань (табл. 3.6) – [28, 36, 51, 100, 103], матриці знань (табл. 3.7) – [53, 61, 72, 94, 100], матриці знань (табл. 3.8) – [60, 82, 90, 108], нечіткої бази знань (табл. 3.9) – [23, 60, 91, 71], нечіткої бази знань (табл. 3.10) – [4, 9, 21, 40, 67, 81, 92, 96, 103, 107].

Матриця знань до співвідношення (3.1)

№№	y_4	y_5	x_{19}	D
1	В	НП	-	D_1
2	ВС	НП	-	
3	С	НП	-	
4	НС	НП	-	D_2
5	Н	НП	-	
6	-	ОСВ	-	D_3
7	-	МПН	М	D_4
8	-	МПН	С	D_5
9	-	МПН	В	
10	Н	НПН	М	
11	НС	НПН	М	
12	Н	НПН	С	D_6
13	НС	НПН	С	
14	С	НПН	М	
15	ВС	НПН	М	
16	Н	НПН	В	
17	НС	НПН	В	D_7
18	В	НПН	М	
19	С	НПН	С	
20	ВС	НПН	С	D_8
21	В	НПН	С	
22	С	НПН	В	D_9
23	ВС	НПН	В	
24	В	НПН	В	

Матриця знань до співвідношення (3.2)

№№	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y_3	y_1
25	Г	Н	-	ос	-	нкр	нкр
26	Г	НЗ	-	ос	-	нкр	
27	-	-	НГ	ос	-	-	
28	-	-	-	ос	вкр	-	
29	-	-	-	ос	кр	нкр	
30	Г	Н	НГ	ос	кр	-	
31	-	-	-	ос	вкр	нкр	
32	-	-	НГ	ос	кр	нкр	
33	-	-	-	ср	-	кр		кр
34	с	НЗ	Н	ср	нкр	кр	
35	Г	Н	Н	ос	кр	кр	
36	Г	НЗ	Н	ос	нкр	кр	
37	с	Н	Н	ср	нкр	кр	
38	с	НЗ	Н	ср	кр	-	
39	Г	НЗ	Н	ос	кр	-	
40	с	НЗ	-	ос	кр	кр	
41	с	НЗ	-	Н	-	вкр	вкр
42	-	-	П	ср	нкр	вкр	
43	б	-	-	ср	-	вкр	
44	с	Д	П	Н	нкр	-	
45	с	Д	П	Н	нкр	кр	
46	с	Р	П	ср	-	-	
47	б	-	-	Н	-	-	В
48	-	Р	-	Н	-	-	
49	-	-	-	Н	Н	-	

Продовж. табл. 3.6

№№	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y_3	y_1
50	-	-	-	Н	-	В	В
51	с	Д	П	Н	нкp	вкр	
52	-	-	П	Н	-	В	

Таблиця 3.7

Матриця знань до співвідношення (3.3)

№№	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	y_2	
53	-	В	Н	-	НСС	
54	Н	ВС	Н	-		
55	НЗ	ВС	Н	-		
56	Д	ВС	Н	-		
57	Н	с	Н	-		
58	НЗ	с	Н	-		
59	Д	с	Н	с		
60	Д	с	Н	В		
61	-	В	с	-		
62	Н	ВС	с	В		
63	НЗ	ВС	с	В		
64	Д	с	Н	Н		ПМ
65	р	с	Н	-		
66	-	Н	с	-		
67	Д	-	с	-		
68	Н	ВС	с	с		
69	Н	с	с	с		
70	Н	с	В	с		
71	Н	НС	В	с		
72	Н	НС	В	Н		

Продовж. табл. 3.7

№№	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	y_2
73	нз	вс	с	с	ПМ
74	нз	вс	с	н	
75	нз	с	с	с	
76	нз	с	с	н	
77	нз	нс	с	н	
78	нз	нс	с	с	
79	р	-	с	в	
80	р	вс	н	н	
81	р	с	с	с	СПВ
82	р	вс	в	н	
83	д	с	в	с	
84	д	с	в	н	
85	р	с	с	н	
86	р	с	в	с	
87	р	вс	с	н	
88	д	вс	в	н	
89	д	вс	в	с	
90	д	нс	в	н	
91	р	нс	в	-	

Таблиця 3.8

Матриця знань до співвідношення (3.4)

№№	x_8	x_{13}	x_{14}	y_3
92	н	л	вц	нкp
93	н	л	цз	
94	н	л	дз	
95	н	с	вц	

№№	x_8	x_{13}	x_{14}	y_3
96	НС	с	ВЦ	нкp
97	ТНС	с	ВЦ	
98	Н	с	ЦЗ	
99	НС	с	ЦЗ	
100	ТНС	с	ЦЗ	
101	с	с	ЦЗ	
102	Н	с	ДЗ	
103	НС	с	ДЗ	
104	ТНС	с	ДЗ	
105	Н	В	ВЦ	
106	НС	В	ВЦ	
107	ТНС	В	ВЦ	
108	с	В	ВЦ	
109	Н	В	ЦЗ	
110	НС	В	ЦЗ	
111	ТНС	В	ЦЗ	
112	с	В	ЦЗ	
113	ТВС	В	ЦЗ	
114	Н	В	ДЗ	
115	НС	В	ДЗ	
116	ТНС	В	ДЗ	
117	с	В	ДЗ	
118	НС	Л	ВЦ	кp
119	ТНС	Л	ЦЗ	
120	НС	Л	ДЗ	
121	с	с	ВЦ	
122	ТВС	с	ЦЗ	

№№	x_8	x_{13}	x_{14}	y_3
123	с	с	ДЗ	кр
124	ТВС	В	ВЦ	
125	ВС	В	ЦЗ	
126	ТВС	В	ДЗ	
127	ТНС	Л	ВЦ	вкр
128	с	Л	ВЦ	
129	с	Л	ЦЗ	
130	ТВС	Л	ЦЗ	
131	ТНС	Л	ДЗ	
132	с	Л	ДЗ	
133	ТВС	с	ВЦ	
134	ВС	с	ЦЗ	
135	ТВС	с	ДЗ	
136	ВС	В	ВЦ	
137	В	В	ЦЗ	
138	ВС	В	ДЗ	
139	ТВС	Л	ВЦ		В
140	ВС	Л	ВЦ	
141	ВС	Л	ЦЗ	
142	ТВС	Л	ДЗ	
143	ВС	Л	ДЗ	
144	ВС	с	ВЦ	
145	В	с	ВЦ	
146	В	Л	-	
147	В	с	ЦЗ	
148	ВС	с	ДЗ	
149	В	с	ДЗ	

Продовж. табл. 3.8

№№	x_8	x_{13}	x_{14}	y_3
150	В	В	ВЦ	В
151	В	В	ДЗ	

Таблиця 3.9

Матриця знань до співвідношення (3.5)

№№	x_{15}	x_{16}	d_7	x_{18}	y_4
152	ДП	СП	В	СС	Н
153	ДП	СП	В	БС	
154	СЛ	СП	ВС	БС	
155	ТСЛ	СП	В	БС	
156	ТСЛ	СП	В	СС	
157	ДП	ЛСГ	ВС	АЦ		НС
158	ТСЛ	ЛСГ	ВС	АЦ	
159	СЛ	ЛСГ	ВС	СС	
160	ССЛ	ЛСГ	ВС	СС	
161	ЧОП	ЛСГ	НС	АЦ	С
162	ЧОП	ССГ	НС	АЦ	
163	ЧПД	ССГ	С	АЦ	
164	ЧПТ	ЛСГ	НС	АЦ	
165	ТСЛ	ССГ	НС	АЦ	
166	ЧОП	ССГ	С	АЦ	
167	К	ЛГ	С	АЦ	
168	ЧПТ	ЛСГ	С	АЦ	ВС
169	ЧПТ	ССГ	НС	АЦ	
170	ЧЗВ	ЛГ	С	АЦ	
171	ЧЗВ	ССГ	НС	АЦ	
172	ЧПД	ЛГ	НС	АЦ	

Продовж. табл. 3.9

№№	x_{15}	x_{16}	d_7	x_{18}	y_4
173	к	сгг	с	ац	вс
174	к	лг	нс	ац	
175	чоп	всг	с	ац	
176	чзв	всг	нс	ац	в
177	чпт	всг	нс	ац	
178	к	г	н	ац	
179	к	всг	нс	ац	
180	чпд	всг	нс	ац	
181	чзв	г	н	ац	

Таблиця 3.10

Матриця знань до співвідношення (3.6)

№№	x_1	x_2	y_1	y_2	y_5
182	-	бо	в	-	нп
183	-	бо	вкр	спв	
184	-	оєб	в	-	
185	-	оєб	вкр	спв	
186	-	оєб	вкр	пм	
187	-	вз	в	-	
188	нкр	вз	вкр	-	
189	нкр	вз	кр	спв	
190	нкр	вз	кр	пм	
191	кр	вз	вкр	спв	
192	кр	вз	вкр	пм	
193	нкр	гз	-	-	
194	кр	гз	в	-	
195	кр	гз	вкр	-	

№№	x_1	x_2	y_1	y_2	y_5
196	кр	гз	кр	спв	осв
197	-	бо	вкр	нсс	
198	-	бо	вкр	пм	
199	-	оeb	вкр	нсс	
200	нкр	вз	кр	нсс	
201	кр	вз	вкр	нсс	
202	нкр	вз	нкр	спв		мпн
203	нкр	вз	нкр	пм	
204	кр	гз	кр	нсс	
205	кр	гз	кр	пм	
206	кр	гз	нкр	-	
207	кр	вз	кр	спв	
208	-	оeb	кр	спв	
209	-	бо	кр	-	нпн
210	-	бо	нкр	-	
211	-	оeb	кр	нсс	
212	-	оeb	кр	пм	
213	-	оeb	нкр	-	
214	кр	вз	кр	нсс	
215	кр	вз	кр	пм	
216	кр	вз	нкр	-	
217	нкр	вз	нкр	нсс	

3.3.2. Моделювання процесу прийняття рішень при визначенні строків та норм поливу на базі нечіткої логіки

Математична модель прийняття рішень при визначенні параметрів режимів зрошення заснована на побудові за матрицями знань системи нечітких логічних рівнянь. При складанні нечітких логічних рівнянь вагові коефіцієнти, що визначають ступінь упевненості експерта в істинності правил, приймалися рівними одиниці (бралися до уваги тільки правила безперечної істини). У рівняннях, що склалися за правилами, представленими в неповному форматі, вилучались функції належності змінних, які не змінювали істинності правил.

Функції належності змінної x до довільного нечіткого терму T розраховувалися за формулою дзвіноподібної функції належності (2.8). Параметри b і c функцій належності були отримані після навчання моделі генетичними алгоритмами.

Нечіткі логічні рівняння для визначення діагнозів поливу, що відповідають співвідношенню (3.1), запишемо за матрицею знань з табл. 3.5 у вигляді:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(D) = & [\mu^g(y_4) \wedge \mu^{nn}(y_5)] \vee \\ & \vee [\mu^{gc}(y_4) \wedge \mu^{nn}(y_5)] \vee ; \\ & \vee [\mu^c(y_4) \wedge \mu^{nn}(y_5)] \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(D) = & [\mu^{nc}(y_4) \wedge \mu^{nn}(y_5)] \vee ; \\ & \vee [\mu^n(y_4) \wedge \mu^{nn}(y_5)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\mu^{d_3}(D) = \mu^{ocg}(y_5); \quad (3.9)$$

$$\mu^{d_4}(D) = \mu^{mnn}(y_5) \wedge \mu^M(x_{19}) ; \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_5}(D) &= [\mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^c(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^e(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^h(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^m(x_{19})] \vee ; \\
&\vee [\mu^{hc}(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^m(x_{19})]
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_6}(D) &= [\mu^h(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^c(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^{hc}(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^c(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^c(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^m(x_{19})] \vee ; \\
&\vee [\mu^{ec}(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^m(x_{19})]
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_7}(D) &= [\mu^h(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^e(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^{hc}(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^e(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^e(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^m(x_{19})] \vee ; \\
&\vee [\mu^c(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^c(x_{19})]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_8}(D) &= [\mu^{ec}(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^c(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^e(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^c(x_{19})] ;
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_9}(D) &= [\mu^c(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^e(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^{ec}(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^e(x_{19})] \vee \\
&\vee [\mu^e(y_4) \wedge \mu^{mnh}(y_5) \wedge \mu^e(x_{19})] .
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Для матриці знань (табл. 3.6) нечіткі логічні рівняння визначення вологозабезпеченості рослин, відповідно до співвідношення (3.2), запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned}
\mu^{hkp}(y_1) = & \left[\mu^z(x_3) \wedge \mu^h(x_4) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{hkp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^z(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{hkp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h2}(x_5) \wedge \mu^{oc}(x_6) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{6kp}(x_7) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \wedge \mu^{hkp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^z(x_3) \wedge \mu^h(x_4) \wedge \mu^{h2}(x_5) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{6kp}(x_7) \wedge \mu^{hkp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h2}(x_5) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \wedge \mu^{hkp}(y_3) \right]
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{kp}(y_1) = & \left[\mu^{cp}(x_6) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^h(x_5) \wedge \mu^{cp}(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^z(x_3) \wedge \mu^h(x_4) \wedge \mu^h(x_5) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^z(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^h(x_5) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee ; \tag{3.17} \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^h(x_4) \wedge \mu^h(x_5) \wedge \mu^{cp}(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^h(x_5) \wedge \mu^{cp}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^z(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^h(x_5) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^{oc}(x_6) \wedge \mu^{kp}(x_7) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{6kp}(y_1) = & \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^{h3}(x_4) \wedge \mu^h(x_6) \wedge \mu^{6kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^n(x_5) \wedge \mu^{cp}(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \wedge \mu^{6kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{\bar{6}}(x_3) \wedge \mu^{cp}(x_6) \wedge \mu^{6kp}(y_3) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^{\bar{d}}(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^h(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^{\bar{d}}(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^h(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \wedge \mu^{kp}(y_3) \right] \vee ; \tag{3.18} \\
& \vee \left[\mu^c(x_3) \wedge \mu^p(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^{cp}(x_6) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^e(y_1) = & [\mu^{\delta}(x_3) \wedge \mu^h(x_6)] \vee \\
& \vee [\mu^p(x_4) \wedge \mu^h(x_6)] \vee \\
& \vee [\mu^h(x_6) \wedge \mu^h(x_7)] \vee \\
& \vee [\mu^h(x_6) \wedge \mu^e(y_3)] \vee \\
& \vee [\mu^c(x_3) \wedge \mu^{\delta}(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^h(x_6) \wedge \mu^{hkp}(x_7) \wedge \mu^{ekp}(y_3)] \vee \\
& \vee [\mu^n(x_5) \wedge \mu^h(x_6) \wedge \mu^e(y_3)]
\end{aligned} \quad . \quad (3.19)$$

Запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення кліматичного фактора за матрицею знань (табл. 3.7), що відповідає співвідношенню (3.3), у вигляді:

$$\begin{aligned}
\mu^{ncc}(y_2) = & [\mu^e(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11})] \vee \\
& \vee [\mu^h(x_9) \wedge \mu^{ec}(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11})] \vee \\
& \vee [\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^{ec}(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11})] \vee \\
& \vee [\mu^{\delta}(x_9) \wedge \mu^{ec}(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11})] \vee \\
& \vee [\mu^h(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11})] \vee \\
& \vee [\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11})] \vee \quad ; \\
& \vee [\mu^{\delta}(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12})] \vee \\
& \vee [\mu^{\delta}(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11}) \wedge \mu^e(x_{12})] \vee \\
& \vee [\mu^e(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11})] \vee \\
& \vee [\mu^h(x_9) \wedge \mu^{ec}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^e(x_{12})] \vee \\
& \vee [\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^{ec}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^e(x_{12})]
\end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned}
\mu^{nm}(y_2) = & \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^c(x_{11}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_9) \wedge \mu^{hc}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_9) \wedge \mu^{hc}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^{hc}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{h3}(x_9) \wedge \mu^{hc}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^6(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^h(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right]
\end{aligned}$$

;

(3.21)

$$\begin{aligned}
\mu^{cn6}(y_2) = & \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^c(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^c(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^{6c}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^c(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^\delta(x_9) \wedge \mu^{hc}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \wedge \mu^h(x_{12}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^p(x_9) \wedge \mu^{hc}(x_{10}) \wedge \mu^6(x_{11}) \right]
\end{aligned}$$

.

(3.22)

Запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення рівня забезпеченості ґрунтовою вологою за матрицею знань (табл. 3.8), що відповідає співвідношенню (3.4), у вигляді:

$$\begin{aligned}
\mu^{кр}(y_3) = & \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^l(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^l(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^l(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{m6c}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^h(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee ; \\
& \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right]
\end{aligned}
\tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{кр}(y_3) = & \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^l(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mhc}(x_8) \wedge \mu^l(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{hc}(x_8) \wedge \mu^l(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{m6c}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \quad ; \tag{3.24} \\
& \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{m6c}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{6y}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{6c}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{m6c}(x_8) \wedge \mu^6(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{екр}(y_3) = & \left[\mu^{mnc}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{mec}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mnc}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^c(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mec}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mec}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^e(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^e(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^e(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right]
\end{aligned} \quad ; \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}
\mu^e(y_3) = & \left[\mu^{mec}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mec}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^n(x_{13}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{y3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{ec}(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^c(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^e(x_{13}) \wedge \mu^{ey}(x_{14}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^e(x_8) \wedge \mu^e(x_{13}) \wedge \mu^{\partial 3}(x_{14}) \right]
\end{aligned} \quad (3.26)$$

Запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення вологості ґрунту за матрицею знань (табл. 3.9), що відповідає співвідношенню (3.5), у вигляді:

$$\begin{aligned}
\mu^n(y_4) = & \left[\mu^{\partial n}(x_{15}) \wedge \mu^{cn}(x_{16}) \wedge \mu^e(x_{17}) \wedge \mu^{cc}(x_{18}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{\partial n}(x_{15}) \wedge \mu^{cn}(x_{16}) \wedge \mu^e(x_{17}) \wedge \mu^{\bar{c}c}(x_{18}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{cl}(x_{15}) \wedge \mu^{cn}(x_{16}) \wedge \mu^{ec}(x_{17}) \wedge \mu^{\bar{c}c}(x_{18}) \right] \vee \quad ; \quad (3.27) \\
& \vee \left[\mu^{mcl}(x_{15}) \wedge \mu^{cn}(x_{16}) \wedge \mu^e(x_{17}) \wedge \mu^{\bar{c}c}(x_{18}) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{mcl}(x_{15}) \wedge \mu^{cn}(x_{16}) \wedge \mu^e(x_{17}) \wedge \mu^{cc}(x_{18}) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{hc}(y_4) &= [\mu^{\partial n}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^{6c}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{mc\lambda}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^{6c}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{c\lambda}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^{6c}(x_{17}) \wedge \mu^{cc}(x_{18})] \vee \quad ; \quad (3.28) \\
&\vee [\mu^{cc\lambda}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^{6c}(x_{17}) \wedge \mu^{cc}(x_{18})]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^c(y_4) &= [\mu^{4on}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4on}(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4n\partial}(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4nm}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \quad ; \quad (3.29) \\
&\vee [\mu^{mc\lambda}(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4on}(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^k(x_{15}) \wedge \mu^{l2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{6c}(y_4) &= [\mu^{4nm}(x_{15}) \wedge \mu^{lc2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4nm}(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{436}(x_{15}) \wedge \mu^{l2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{436}(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \quad ; \quad (3.30) \\
&\vee [\mu^{4n\partial}(x_{15}) \wedge \mu^{l2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^k(x_{15}) \wedge \mu^{cc2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^k(x_{15}) \wedge \mu^{l2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4on}(x_{15}) \wedge \mu^{6c2}(x_{16}) \wedge \mu^c(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^6(y_4) &= [\mu^{436}(x_{15}) \wedge \mu^{6c2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4nm}(x_{15}) \wedge \mu^{6c2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^k(x_{15}) \wedge \mu^z(x_{16}) \wedge \mu^h(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \quad (3.31) \\
&\vee [\mu^k(x_{15}) \wedge \mu^{6c2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{4n\partial}(x_{15}) \wedge \mu^{6c2}(x_{16}) \wedge \mu^{hc}(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})] \vee \\
&\vee [\mu^{436}(x_{15}) \wedge \mu^z(x_{16}) \wedge \mu^h(x_{17}) \wedge \mu^{ay}(x_{18})]
\end{aligned}$$

За матрицею знань (табл. 3.10) запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення необхідності поливу, відповідно до співвідношення (3.6), у вигляді:

$$\begin{aligned}
\mu^{nn}(y_5) = & \left[\mu^{\bar{o}o}(x_2) \wedge \mu^e(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{\bar{o}o}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{cne}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe\bar{o}}(x_2) \wedge \mu^B(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe\bar{o}}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{cne}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe\bar{o}}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \left[\mu^{63}(x_2) \wedge \mu^e(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{nkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{nkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{cne}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{nkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{cne}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{nkp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \wedge \mu^e(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{cne}(y_2) \right]
\end{aligned} \quad ; \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned}
\mu^{ocv}(y_5) = & \left[\mu^{\bar{o}o}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{ncc}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{\bar{o}o}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe\bar{o}}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{ncc}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{nkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{ncc}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{6kp}(y_1) \wedge \mu^{ncc}(y_2) \right]
\end{aligned} \quad ; \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned}
\mu^{mnh}(y_5) = & \left[\mu^{hkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \wedge \mu^{cn6}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{hkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{hcc}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee & ; \quad (3.34) \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{23}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{cn6}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe6}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{cn6}(y_2) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{nhn}(y_5) = & \left[\mu^{6o}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{6o}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe6}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{hcc}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe6}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{oe6}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \right] \vee & . \quad (3.35) \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{hcc}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{kp}(y_1) \wedge \mu^{nm}(y_2) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{kp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \right] \vee \\
& \vee \left[\mu^{hkp}(x_1) \wedge \mu^{63}(x_2) \wedge \mu^{hkp}(y_1) \wedge \mu^{hcc}(y_2) \right]
\end{aligned}$$

3.4. Методика прийняття рішень при визначенні параметрів режимів зрошення за системою нечітких логічних рівнянь

Представимо методику прийняття рішень при визначенні строків та норм поливу шляхом побудови і розв'язання системи нечітких логічних рівнянь.

Вибір одного з варіантів поливу при фіксованих значеннях вхідних змінних представимо послідовністю дій, що складається з наступних дев'яти пунктів:

1. Отримати вектор значень вхідних змінних $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{19}^*)$, що визначають необхідність зрошення.

2. Обчислити значення функцій належності вхідних змінних до їх

лінгвістичних термів, що наведені в табл. 3.3.

3. Знайдені значення функцій належності підставити в нечіткі логічні рівняння (3.23) – (3.26) та обчислити значення функцій належності змінної y_3 – «рівень забезпеченості ґрунтовою вологою» до термів «нкр», «кр», «вкр» та «в».

4. Знайдені у п. 2 і 3 значення функцій належності підставити в нечіткі логічні рівняння (3.16) – (3.19) та обчислити значення функцій належності узагальненої змінної y_1 – «вологозабезпеченість рослин» до термів «нкр», «кр», «вкр» та «в».

5. Обчислити за рівняннями (3.20) – (3.22) значення функцій належності узагальненої змінної y_2 – «кліматичний фактор» до термів «нсс», «пм» та «спв».

6. Обчислити за рівняннями (3.32) – (3.35) ступені належності узагальненої змінної y_5 – «необхідність поливу» до термів «нп», «осв», «мпн» та «нпн».

7. За рівняннями (3.27) – (3.31) обчислити значення функцій належності змінної y_4 – «найменша вологоємність» до термів «н», «нс», «с», «вс» та «в».

8. Підставити знайдені у попередніх пунктах значення функцій належності в нечіткі логічні рівняння (3.7) – (3.15) та обчислити ступені належності рішення до термів $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9$ відповідно.

9. Із множини термів-розв'язків $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9$ обрати те рішення, функція належності якого є найбільшою.

3.5. Навчання нечіткої моделі діагностування зрошуваного поля

Навчання нечіткої моделі зводиться до настроювання параметричних функцій належності по навчальній вибірці за допомогою генетичних алгоритмів. Навчальна вибірка задана у вигляді 304 пар експериментальних даних

$$(X^l, d^l), l = \overline{1, 304},$$

де $X^l = (x_1^l, x_2^l, \dots, x_{19}^l)$ і d^l – вхідний вектор і відповідний клас рішення для l -ої пари «вхід – вихід», $d^l \in (d_1, d_2, \dots, d_9)$. Особливістю навчальної вибірки є те, що вона є нечіткою, тобто деякі вхідні змінні задані лінгвістичними термами. Навчальну вибірку наведено у додатку А.

Настроювання моделі на базі нечіткої логіки здійснюється шляхом мінімізації розбіжності між модельним та еталонним результатом:

$$\sum_{l=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\mu^{d_j}(X^l, B, C) - \mu^{d_j}(X^l) \right]^2 \right\} = \min_{B, C}, \quad (3.36)$$

де $\mu^{d_j}(X^l, B, C)$ – функція належності вихідної змінної до термів-рішень d_j ,

$$\mu^{d_j}(X^l) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d_j = d^l \\ 0, & \text{якщо } d_j \neq d^l \end{cases} . \quad (3.37)$$

3.5.1. Генетичні алгоритми оптимізації

Генетичні алгоритми будемо використовувати як оптимізаційні методи, що дозволяють мінімізувати відстань між бажаним та модельним результатом логічного висновку. У зв'язку з цим розглянемо основні поняття та принципи їх використання.

Для реалізації генетичного алгоритму необхідний випадковий набір варіантів розв'язків, який називають популяцією. Варіант розв'язку, що входить до популяції, у закодованому вигляді називається хромосомою, котра визначає певне рішення оптимізаційної задачі в першому наближенні. Хромосома формується як послідовність символів певної природи – генів [83].

Генетичний алгоритм складається із певної кількості ітерацій, і кожна наступна популяція генетичного алгоритму називається поколінням (або

генерацією). Аналогічно природній еволюції в результаті певної кількості ітерацій відбувається також і еволюція хромосом з початкової популяції. Для оцінювання ступеня пристосованості хромосом у популяції використовується функція відповідності (англ. fitness function), при цьому селекція відбувається шляхом вибору хромосоми з найбільшим ступенем пристосованості. Наступне нове покоління формується в результаті рекомбінації генів за рахунок схрещування (англ. crossover) двох хромосом-батьків з поточної популяції або в результаті мутації, що відбувається шляхом випадкової зміни елементів однієї хромосоми. Після застосування генетичних операторів схрещування та мутації відбувається селекція хромосом за функцією відповідності.

Через декілька поколінь генетичного алгоритму відбирається хромосома з найбільшою функцією відповідності. Така хромосома відповідає оптимальному, або близькому до оптимального, розв'язку.

Для покоління t популяція індивідуумів позначається через $P(t)$, а набір нащадків, що були отримані із поточної популяції, – через $C(t)$. З уведеними позначеннями загальна структура генетичного алгоритму має такий вигляд [111]:

Процедура: Генетичний алгоритм

початок

$t:=0$;

ініціалізувати $P(t)$;

оцінити $P(t)$;

поки (не_досягнуто умови_завершення)

схрещувати $P(t)$, щоб одержати $C(t)$;

оцінити $C(t)$;

вибрати $P(t+1)$ із $P(t)$ і $C(t)$;

$t:=t+1$;

кінець

кінець.

3.5.2. Основні операції генетичних алгоритмів

На першому етапі схрещування хромосоми із популяції батьків об'єднуються у пари випадковим чином з імовірністю p_c . Далі встановлюється позиція гена у хромосомі, що визначає точку схрещування (англ. cut-point). У результаті схрещування хромосом-батьків створюються хромосоми-нащадки шляхом комбінування сегментів першого і другого батьків відносно точки схрещування.

Імовірність p_c визначає відсоток нащадків, що створюються на кожній ітерації, і називається коефіцієнтом схрещування. Таким чином, кількість хромосом-нащадків у результаті схрещування визначається як добуток p_c на кількість хромосом у популяції. Збільшення коефіцієнта p_c розширює пошуковий простір, але може привести до витрати часу на дослідження безперспективних областей.

У результаті мутації хромосоми відбувається певним чином випадкова зміна гена з імовірністю p_m . При цьому для кожного гена хромосоми визначається випадкове число, що визначає того з генів, для якого відбудеться мутація. Операція мутації в генетичних алгоритмах визначається необхідністю відновлення генів, що були вилучені з популяції в ході операції відбору і які тепер можуть бути досліджені в новому контексті, та можливістю утворення генів, котрі не були представлені в початковій популяції [83].

Імовірність p_m визначає відсоток генів, що зазнають мутації на поточній ітерації, і називається коефіцієнтом мутацій. При цьому невелика інтенсивність мутацій може призвести до втрати корисних варіантів, які не зможуть бути розглянуті, а при зростанні значення p_m генетичний алгоритм утратить можливість навчання.

3.5.3. Кодування нечіткої моделі

Для навчання нечіткої моделі за допомогою генетичних алгоритмів хромосому, що відповідає початковому рішенню, визначимо як вектор параметрів B, C функцій належностей наступним чином:

$$S = (B, C) = (b_{11}, c_{11}, b_{12}, c_{12}, \dots, b_{i1}, c_{i1}, \dots, b_{il_i}, c_{il_i}, \dots, b_{191}, c_{191}, b_{192}, c_{192}, b_{193}, c_{193}), \quad (3.38)$$

де l_i – кількість термів-оцінок вхідної змінної X_i ; $l_1 + l_2 + \dots + l_{19} = 77$, $i = \overline{1, 19}$.

При абсолютній достовірності нечіткої бази знань поведінка нечіткої моделі цілком залежить від параметрів вектора S . Тому для настроювання нечіткої моделі вектор S можна розглядати як закодований розв'язок оптимізаційної задачі у вигляді хромосоми, що зображена на рис. 3.3.

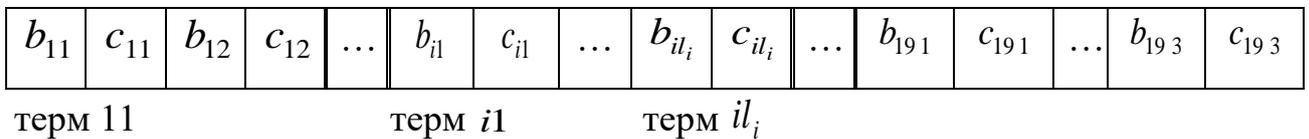


Рис. 3.3. Хромосома нечіткої моделі

3.5.4. Ініціалізація популяції

Для здійснення генетичного алгоритму необхідно спочатку закодувати початковий розв'язок задачі у певній кількості хромосом-батьків. Ініціалізація популяції відбувається шляхом формування початкової популяції випадковим набором варіантів розв'язків у вигляді хромосоми, що складається з параметрів функцій належності (рис. 3.5).

Визначення генів хромосом відбувається випадковим чином за формулами [83]:

$$b_i^0 = \text{RANDOM} \left(\left[\underline{x}_i, \overline{x}_i \right] \right), \quad (3.39)$$

$$c_i^0 = \text{RANDOM} \left(\left[\underline{c}_i, \overline{c}_i \right] \right), \quad (3.40)$$

де $\text{RANDOM} \left(\left[\underline{a}, \overline{a} \right] \right)$ – операція знаходження рівномірно розподіленого на

інтервалі $[\underline{\hat{a}}, \bar{\hat{a}}]$ випадкового числа;

$[\underline{x}_i, \bar{x}_i]$ – універсальна множина змінної x_i ;

$[\underline{c}_i, \bar{c}_i]$ – діапазон значень коефіцієнта розтягування функції належності змінної x_i .

3.5.5. Оцінювання пристосованості хромосом

Для оцінювання хромосоми у популяції використовується функція відповідності $FF(S)$ (від англ. fitness function), що визначає найкращу на такій ітерації хромосому для проведення операції схрещування. Для нечітких моделей $\mu^{d_j}(y) = \mu^{d_j}(X, B, C)$ об'єктів з дискретним виходом функція відповідності хромосоми S (3.38), буде мати вигляд [83]

$$FF(S) = -\sum_{l=1}^{304} \left[\sum_{j=1}^9 \left[\mu^{d_j}(X^l, B, C, W) - \mu^{d_j}(X^l) \right]^2 \right]. \quad (3.41)$$

У теорії генетичних обчислень вважається, що функція відповідності збільшується із зростанням якості хромосоми, тому для збереження звичайного розуміння функції відповідності у виразі (3.41) уведений знак «мінус».

3.5.6. Селекція хромосом

Селекція хромосом необхідна для визначення із популяції поточного покоління генетичного алгоритму тих пар батьків, що більш пристосовані до схрещування. При цьому схрещування повинно здійснюватися для хромосом з найбільшим значенням функції відповідності, а не випадковим чином.

Тому вибір батьків відбувається залежно від імовірності, що розраховується за наступною формулою [83]:

$$P_i = \frac{FF'(S_i)}{\sum_{j=1}^K FF'(S_j)}, \quad (3.42)$$

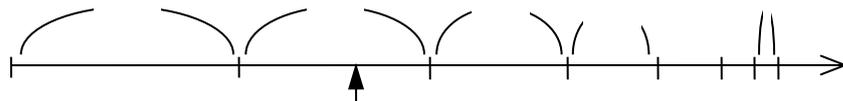
де $FF'(S_i) = FF(S_i) - \min_{j=1, K} FF(S_j)$.

Тобто для кожної хромосоми S_i з популяції визначається ймовірність P_i , що відповідає умовам: $p_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^K p_i = 1$, $FF(S_i) > FF(S_j) \Rightarrow p_i > p_j$, де K – розмір поточної популяції. Таким чином, чим більше значення ймовірності, тим більше шансів у хромосоми бути вибраною для схрещування.

Для вибору хромосом, що підлягають схрещуванню, застосовується наступний алгоритм [83]:

1. Для кожної хромосоми визначити інтервали довжиною P_i та послідовно розмістити їх на горизонтальній осі (рис. 3.4).

2. Провести розіграш, що зводиться до знаходження випадкового числа Z (рис. 3.6) з рівномірним законом розподілу на інтервалі $[0, 1]$.



3. Відбирається батьківська хромосома S_i , що має підінтервал P_i , в який потрапляє число Z . Тобто шанси бути обраною у хромосоми зростають зі збільшенням ймовірності P_i .

4. Для вибору другої батьківської хромосоми провести дії відповідно до пп. 1 – 3.

3.5.7. Схрещування

Операція схрещування двох хромосом-батьків відбувається відносно 19-х точок обміну, що відповідають 19-м вхідним змінним.

Для наочної демонстрації операції схрещування розглянемо схрещування двох хромосом батьків відносно точки обміну, що відповідає змінній x_l і дорівнює $z_1 = 1$.

Якщо позначити хромосом-батьків як S_1 і S_2 , а хромосом-нащадків як Ch_1 і Ch_2 , то операцію схрещування можна представити схемою, що зображена на рис 3.5.

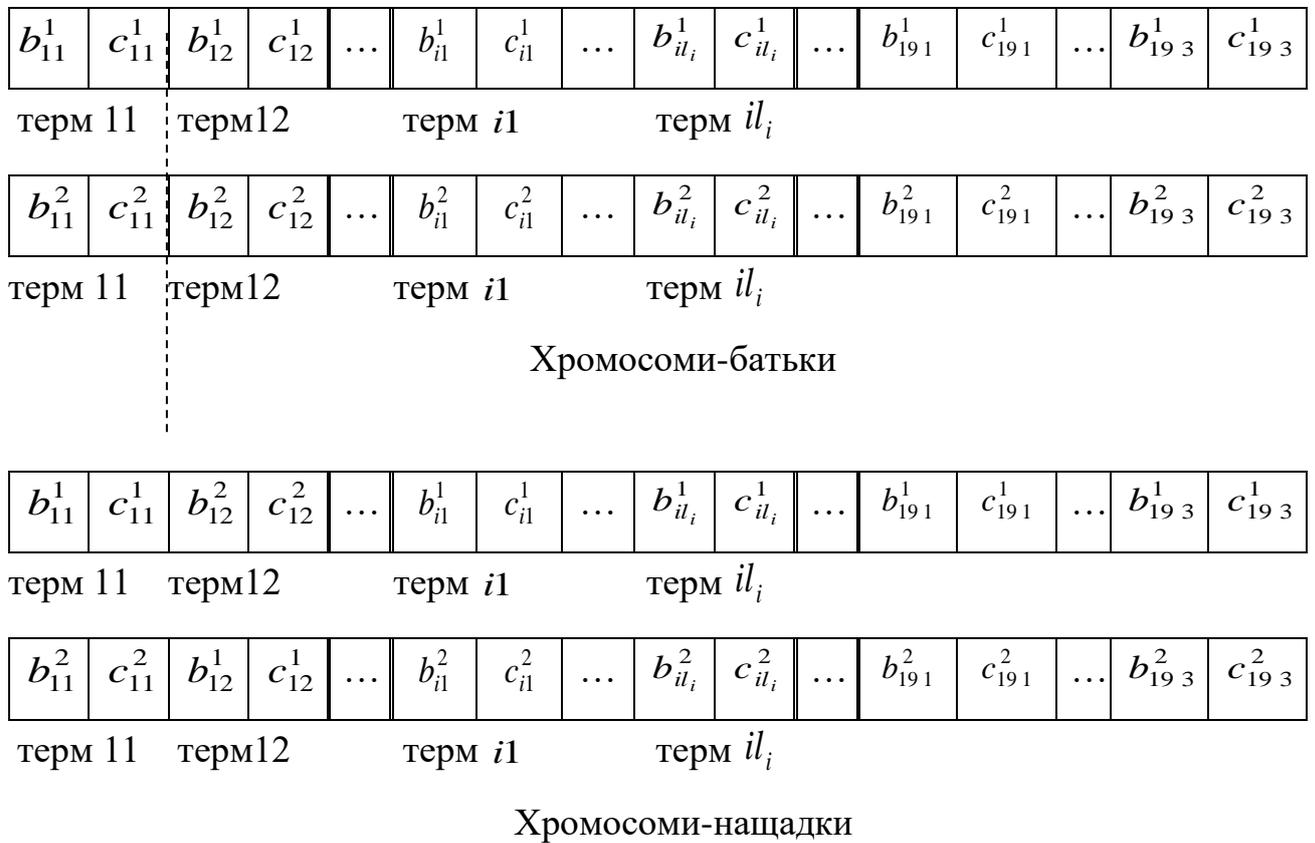


Рис. 3.5. Схрещування відносно першої точки обміну

У результаті обміну генами, які відповідають термам «некритичний» та «критичний», може трапитись, що $b_{11} > b_{12}$, коли $1 < 2$. У цьому випадку треба поміняти b_{11} і b_{12} місцями. Тому потрібно контролювати впорядкованість

термів після проведення кожної операції схрещування.

Для представлення алгоритму проведення схрещування введемо такі позначення:

$b_{ij}^{S_1}, c_{ij}^{S_1}$ – ij -ті значення координати максимуму та коефіцієнта розтягування функції належності відповідно у хромосомі S_1 ;

$b_{ij}^{S_2}, c_{ij}^{S_2}$ – ij -ті значення координати максимуму та коефіцієнта розтягування функції належності відповідно у хромосомі S_2 ;

$b_{ij}^{Ch_1}, c_{ij}^{Ch_1}$ – ij -ті значення координати максимуму та коефіцієнта розтягування функції належності відповідно у хромосомі-нащадку Ch_1 ;

$b_{ij}^{Ch_2}, c_{ij}^{Ch_2}$ – ij -ті значення координати максимуму та коефіцієнта розтягування функції належності відповідно у хромосомі-нащадку Ch_2 .

Схрещування двох хромосом-батьків S_1 і S_2 , у результаті якого з'являються нащадки Ch_1 і Ch_2 , здійснюється за наступним алгоритмом [83]:

1. Визначити випадковим чином 19 цілих точок обміну z_i :

$1 \leq z_i < l_i$, де l_i – кількість термів вхідних змінних X_i , $i = \overline{1, 19}$.

2. Скомбінувати гени хромосом-батьків S_1 і S_2 відносно встановлених точок обміну z_i за правилами:

$$b_{ij}^{Ch_1} = \begin{cases} b_{ij}^{S_1}, & j \leq z_i \\ b_{ij}^{S_2}, & j > z_i \end{cases}, \quad b_{ij}^{Ch_2} = \begin{cases} b_{ij}^{S_2}, & j \leq z_i \\ b_{ij}^{S_1}, & j > z_i \end{cases}, \quad (3.43)$$

$$c_{ij}^{Ch_1} = \begin{cases} c_{ij}^{S_1}, & j \leq z_i \\ c_{ij}^{S_2}, & j > z_i \end{cases}, \quad c_{ij}^{Ch_2} = \begin{cases} c_{ij}^{S_2}, & j \leq z_i \\ c_{ij}^{S_1}, & j > z_i \end{cases}, \quad (3.44)$$

$$1 \leq j < l_i, \quad i = \overline{1, 19}.$$

3. Для контролю впорядкованості термів перевірити значення координат максимуму функцій належності

$$(b_{i\varepsilon} > b_{i\eta}) \wedge (\varepsilon < \eta) \Rightarrow b_{i\varepsilon} \leftrightarrow b_{i\eta}, c_{i\xi} \leftrightarrow c_{i\eta}, 1 \leq \xi, \eta \leq l_i, i = \overline{1, n}, \quad (3.45)$$

де \leftrightarrow символ обміну.

3.5.8. Мутація

Мутацію генів хромосоми, що задана вектором (3.38), будемо здійснювати з імовірністю $p_m = 0,05$.

Мутація генів відбувається випадковим чином відповідно до формул [83]:

$$Mu(b_{ij}): b_{ij} = RANDOM(\underline{x_i}, \overline{x_i}), \quad (3.46)$$

$$Mu(c_{ij}): c_{ij} = RANDOM(\underline{c_i}, \overline{c_i}), \quad (3.47)$$

де $[\underline{c_i}, \overline{c_i}]$ – діапазон зміни значень коефіцієнта розтягування функції

належності термів вхідної змінної X_i , $[\underline{c_i}, \overline{c_i}] \in (0, +\infty)$, $i = \overline{1, n}$;

$[\underline{x_i}, \overline{x_i}]$ – універсальна множина змінної x_i ;

$RANDOM(\underline{a}, \overline{a})$ – операція знаходження рівномірно розподіленого на інтервалі $[\underline{a}, \overline{a}]$ випадкового числа.

Операція мутації окремих генів хромосом здійснюється за наступним алгоритмом [83]:

1. Згенерувати $77 \cdot 2 = 144$ випадкових чисел для кожного гена вектора S (3.36) за допомогою функції $z = RANDOM([0,1])$.

Елемент вектора S не піддавати операції мутації у випадку, коли

$Z > P_m$, інакше перейти до пункту 2.

2. Виконати операцію мутації вибраного гена хромосоми S за формулами (3.46) – (3.47).

3. Провести контроль за порядком термів відповідно до формули (3.45).

3.5.9. Генетичний алгоритм навчання нечіткої моделі діагностування поливів

Для реалізації генетичного алгоритму встановимо наступні параметри: розмір початкової популяції $K = 100$; коефіцієнт схрещування $P_c = 0,02$; коефіцієнт мутації $P_m = 0,05$; кількість ітерацій генетичного алгоритму дорівнює 5000.

У результаті здійснення однієї ітерації генетичного алгоритму кількість хромосом у популяції буде зростати відповідно до коефіцієнта схрещування, тому для забезпечення сталого розміру популяції після кожного покоління генетичного алгоритму необхідно зменшувати її розмір на $P_c \cdot K$ хромосом з найменшим значенням функції відповідності.

Таким чином, настроювання нечіткої моделі можна представити наступною послідовністю етапів генетичного алгоритму [83]:

1. Ініціалізувати початкову популяцію згідно з п. 3.5.4. у розмірі $K = 100$.
2. Оцінити пристосованість хромосом за функцією відповідності $FF(S_i)$, $i = \overline{1, K}$, використовуючи співвідношення (3.41).
3. Провести селекцію батьківських хромосом згідно з п. 3.5.6 у кількості $\frac{P_c \cdot K}{2} = 10$ пар.
4. Провести схрещування вибраних на попередньому етапі хромосом-батьків відповідно до алгоритму, наведеному в п. 3.5.7.
5. Відповідно до вибраного коефіцієнта мутації виконати операцію з

мутації одержаних після схрещування хромосом-нащадків за алгоритмом, наведеним у п. 3.5.8.

6. Оцінити одержані у попередньому пункті хромосоми за функцією відповідності та зменшити розмір популяції на $p_c \cdot K = 20$ її членів, що мають найменші значення функцій відповідності $FF(S_i)$.

7. Якщо одній із хромосом S_i відповідає значення функції відповідності $FF(S_i) = 0$, вона являє собою оптимальний розв'язок. В іншому випадку потрібно повернутися на другий етап генетичного алгоритму та здійснювати настроювання нечіткої моделі заданою кількістю ітерацій. Після закінчення генетичного алгоритму потрібно обрати хромосому з найбільшим значенням функції відповідності. Така хромосома являє собою субоптимальний розв'язок оптимізаційної задачі.

У результаті настроювання нечіткої моделі генетичними алгоритмами отримали функції належності з наступними параметрами (табл. 3.11).

Таблиця 3.11

Параметри функцій належності лінгвістичних термів після оптимізації

Параметр стану	Терми	Параметри функції належності	
		В	с
x_1 – критична фаза	нкр	0.	0.275
	кр	0.857186	0.198346
x_2 – режим зрошення	бо	0.	0.275
	оєб	0.214295	0.425
	вз	0.429005	0.151978
	гз	1.	0.125
x_3 – рівень ґрунтових вод	б	6.487067	2.2
	с	10.714286	15.
	г	27.858637	3.75

Параметр стану	Терми	Параметри функції належності	
		b	c
x_4 – опади за поточний період	Н	3.571429	8.125
	НЗ	30.85	21.25
	Д	32.142857	2.5
	Р	49.99795	6.393136
x_5 – плач	НГ	0.4257	5.e-002
	Н	0.642857	5.e-002
	П	0.928491	0.13021
x_6 – тургор листів	ос	0.	0.125
	ср	0.214286	5.e-002
	Н	0.428571	0.5
x_7 – концентрація клітинного соку (ККС)	Н	4.285066	1.090532
	нкр	9.946486	1.
	кр	11.96	1.
	вкр	13.69	1.106389
x_8 – вологість ґрунту від НВ	Н	0.	16.181763
	НС	14.285714	20.
	ТНС	35.712123	12.5
	с	35.712123	5.
	ТВС	42.857143	20.
	ВС	64.285714	5.
	В	85.714286	38.75
x_9 – прогноз опадів	Н	0.	10.
	НЗ	2.2	6.25
	Д	24.977373	3.155638
	Р	46.429021	6.231718

Параметр стану	Терми	Параметри функції належності	
		b	c
x_{10} – температура повітря	Н	0.	21.25
	НС	7.142857	10.
	с	14.285714	10.
	ВС	46.428571	10.
	В	50.	2.5
x_{11} – вологість повітря	Н	7.142857	4.996224
	с	78.573887	12.43498
	В	92.858717	4.950708
x_{12} – швидкість вітру	Н	2.85714	5.8125
	с	4.285714	3.
	В	9.642857	2.448482
x_{13} – склад ґрунту	Л	0.3	5.e-002
	с	0.5	5.e-002
	В	0.928883	5.e-002
x_{14} – фаза вегетації	вц	0.285714	5.e-002
	цз	0.5	5.e-002
	дз	1.	5.e-002
x_{15} – тип ґрунтів	дп	0.214286	5.e-002
	сл	0.28561	0.165703
	ссл	0.357143	5.e-002
	тсл	0.42335	0.125
	чоп	0.423321	5.e-002
	чпд	0.423321	0.5
	чзв	0.5	5.e-002
	чпт	0.857143	5.e-002
	к	0.928571	0.275

Параметр стану	Терми	Параметри функції належності	
		b	c
x_{16} – механічний склад ґрунту	СП	0.15	0.1625
	ЛГ	0.18	0.1625
	ССГ	0.21	0.1625
	ВСГ	0.214286	0.5
	ЛГ	0.714286	0.1625
	Г	0.857143	0.5
x_{17} – щільність ґрунту	Н	1.1	3.e-002
	НС	1.228571	0.3
	С	1.485381	0.216783
	ВС	1.528484	0.305685
	В	1.614286	7.5e-002
x_{18} – структурність ґрунту	бс	7.1429e-002	0.5
	сс	0.357143	0.5
	ац	0.423321	0.5
x_{19} – глибина активного шару ґрунту	М	0.	0.275
	С	0.833303	0.163868
	В	0.928477	0.167251

3.6. Визначення адекватності прийняття рішень

Після навчання нечіткої моделі необхідно перевірити збіг комп'ютерного рішення з дійсною необхідністю у зрошенні за тестувальною вибіркою. Такий збіг результатів визначається точністю настроювання параметрів функцій належності за умов достовірних експертних правил з нечіткої бази знань.

Для тестування нечіткої моделі була сформована тестувальна вибірка, що складалася із $N = 90$ ситуацій прийняття рішень, де кожному з 9-ти діагнозів поливу відповідало $N_i = 10$ ситуацій. Усі 90 варіантів прийняття

рішень для перевірки адекватності моделі були розподілені згідно з деревом, що показано на рис 3.6. На цьому дереві позначено:

N_i – кількість ситуацій, в яких необхідно прийняти рішення d_i ;

$$N = N_1 + \dots N_i + \dots N_9;$$

N_{ij} – кількість ситуацій з необхідним варіантом поливу d_i , яким комп'ютер поставив діагноз d_j .

Тоді статистична оцінка якості комп'ютерного діагностування визначається наступним чином [84]:

$$P_{ii} = \frac{N_{ii}}{N_i}, P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i}, P = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^9 N_{ii}, \quad (3.48)$$

де P_{ii} – оцінка ймовірності прийняття рішення d_i за умови об'єктивної необхідності прийняття рішення d_i ;

P_{ij} – оцінка ймовірності прийняття рішення d_j за умови об'єктивної необхідності прийняття рішення d_i ;

P – оцінка ймовірності безпомилкового діагностування за всіма типами діагнозів.

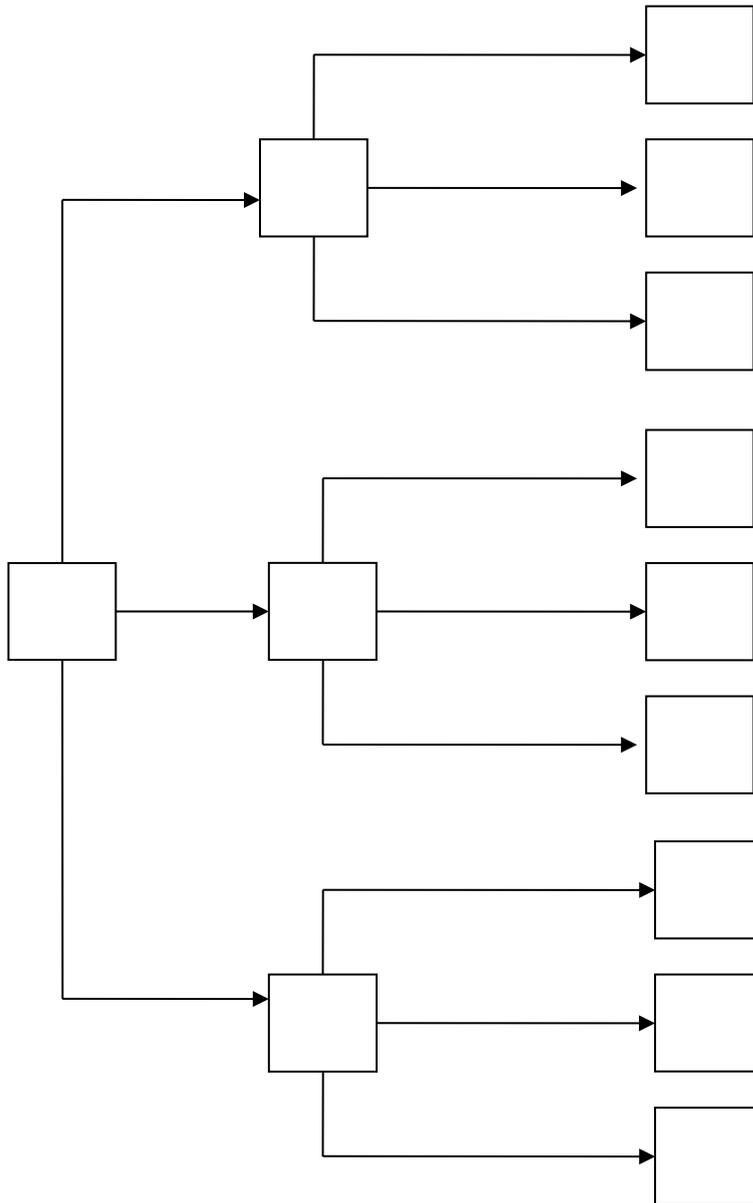


Рис. 3.6. Розподіл діагнозів поливу тестувальної вибірки

Тестування нечіткої моделі визначило 83 збіги із 90 ситуацій тестувальної вибірки, що складає 92,2% правильних рішень щодо необхідності поливу.

3.7. Застосування нечіткого логічного висновку щодо необхідності поливу на прикладі поля томатів

Розглянемо прийняття рішення щодо визначення строків та норм поливу поля томатів. Визначимо значення 19-ти факторів, що впливають на вибір необхідного варіанта поливу, й обчислимо за формулою (2.8) з використанням

табл. 3.11 значення функції належності вхідних змінних нечітким термам. При лінгвістичному оцінюванні вхідних змінних термом з відповідної термножини функції належності до інших термів визначалися як висота перетину відповідних нечітких множин. Таким чином, отримуємо наступні результати:

$$x_1 = \text{«нижче за критичну»}: \mu^{hkp}(x_1) = 1, \mu^{kp}(x_1) = 0,58.$$

$$x_2 = \text{«біологічно оптимальний»}: \mu^{bo}(x_2) = 1, \mu^{oeb}(x_2) = 0,29, \mu^{e3}(x_2) = 0,03, \mu^{e3}(x_2) = 0,02.$$

$$x_3 = 12: \mu^b(x_3) = 0,327, \mu^c(x_3) = 0,825, \mu^e(x_3) = 0,2.$$

$$x_4 = 12: \mu^h(x_4) = 0,752, \mu^{h3}(x_4) = 0,127, \mu^d(x_4) = 0,415, \mu^p(x_4) = 0,206.$$

$$x_5 = \text{«позитивний»}: \mu^{h2}(x_5) = 0,261, \mu^h(x_5) = 0,521, \mu^n(x_5) = 1.$$

$$x_6 = \text{«нормальний»}: \mu^{oc}(x_6) = 0,26, \mu^{cp}(x_6) = 0,95, \mu^h(x_6) = 1.$$

$$x_7 = 5,5: \mu^h(x_7) = 0,599, \mu^{hkp}(x_7) = 0,147, \mu^{kp}(x_7) = 0,008, \mu^{ekp}(x_7) = 0,002.$$

$$x_8 = 82: \mu^h(x_8) = 0,004, \mu^{hc}(x_8) = 0,058, \mu^{mhc}(x_8) = 0,07, \mu^c(x_8) = 0,32, \mu^{m6c}(x_8) = 0,54, \mu^{6c}(x_8) = 0,792, \mu^e(x_8) = 0,89.$$

$$x_9 = 0: \mu^h(x_9) = 1, \mu^{h3}(x_9) = 0,575, \mu^d(x_9) = 0,04, \mu^p(x_9) = 0,02.$$

$$x_{10} = 17: \mu^h(x_{10}) = 0,186, \mu^{hc}(x_{10}) = 0,63, \mu^c(x_{10}) = 0,77, \mu^{6c}(x_{10}) = 0,22, \mu^e(x_{10}) = 0,098.$$

$$x_{11} = 65: \mu^h(x_{11}) = 0,9, \mu^c(x_{11}) = 0,692, \mu^e(x_{11}) = 0,221.$$

$$x_{12} = 3: \mu^h(x_{12}) = 0,85, \mu^c(x_{12}) = 0,66, \mu^e(x_{12}) = 0,106.$$

$$x_{13} = \text{«середні»}: \mu^h(x_{13}) = 0,81, \mu^c(x_{13}) = 1, \mu^e(x_{13}) = 0,245.$$

$$x_{14} = \text{«висадка – цвітіння»}: \mu^{6u}(x_{14}) = 1, \mu^{u3}(x_{14}) = 0,756, \mu^{d3}(x_{14}) = 0,58.$$

$$x_{15} = \text{«чорнозем потужний»}: \mu^{\partial n}(x_{15})=0,13, \mu^{cl}(x_{15})=0,02, \mu^{ccl}(x_{15})=0,6, \mu^{mcl}(x_{15})=0,63, \mu^{chon}(x_{15})=0,5, \mu^{chd}(x_{15})=0,86, \mu^{ch6}(x_{15})=0,6, \mu^{chm}(x_{15})=1, \mu^k(x_{15})=0,8.$$

$$x_{16} = \text{«середні суглинки»}: \mu^{cn}(x_{16})=0,8, \mu^{lcz}(x_{16})=0,91, \mu^{ccz}(x_{16})=1, \mu^{bcz}(x_{16})=0,561, \mu^{lz}(x_{16})=0,512, \mu^e(x_{16})=0,429.$$

$$x_{17} = 1,32: \mu^h(x_{17})=0,03, \mu^{hc}(x_{17})=0,32, \mu^c(x_{17})=0,894, \mu^{6c}(x_{17})=0,21, \mu^e(x_{17})=0,272.$$

$$x_{18} = \text{«агрономічно цінна»}: \mu^{\bar{6}c}(x_{18})=0,34, \mu^{cc}(x_{18})=0,798, \mu^{au}(x_{18})=1.$$

$$x_{19} = 0,3: \mu^m(x_{19})=0,823, \mu^c(x_{19})=0,53, \mu^e(x_{19})=0,051.$$

Обчислимо значення функцій належності змінної y_3 (рівень забезпеченості ґрунтовою вологою) до термів «нкp», «кр», «вкр» та «в», підставляючи знайдені ступені належностей у нечіткі логічні рівняння (3.23) – (3.26).

$$\begin{aligned} \mu^{\text{нкp}}(y_3) &= [0,004 \wedge 0,81 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,004 \wedge 0,81 \wedge 0,756] \vee [0,004 \wedge 0,81 \wedge 0,58] \vee \\ &\vee [0,004 \wedge 1 \wedge 1] \vee [0,058 \wedge 1 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,07 \wedge 1 \wedge 1] \vee [0,004 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee \\ &\vee [0,058 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [0,07 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee \\ &\vee [0,32 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [0,07 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee \\ &\vee [0,058 \wedge 1 \wedge 0,58] \vee [0,07 \wedge 1 \wedge 0,58] \vee \\ &\vee [0,004 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee [0,058 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,07 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee [0,32 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,004 \wedge 0,745 \wedge 0,756] \vee [0,058 \wedge 0,745 \wedge 0,756] \vee \\ &\vee [0,07 \wedge 0,745 \wedge 0,756] \vee [0,32 \wedge 0,745 \wedge 0,756] \vee \\ &\vee [0,54 \wedge 0,745 \wedge 0,756] \vee [0,004 \wedge 0,745 \wedge 0,58] \vee \\ &\vee [0,058 \wedge 0,745 \wedge 0,58] \vee [0,07 \wedge 0,745 \wedge 0,58] \vee \\ &\vee [0,32 \wedge 0,745 \wedge 0,58] = 0,54. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{кр}}(y_3) = & [0,058 \wedge 0,81 \wedge 1] \vee [0,07 \wedge 0,81 \wedge 0,756] \vee [0,058 \wedge 0,81 \wedge 0,58] \vee \\ & \vee [0,32 \wedge 1 \wedge 1] \vee [0,54 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [0,32 \wedge 1 \wedge 0,58] \vee [0,54 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee \\ & \vee [0,792 \wedge 0,245 \wedge 0,756] \vee [0,54 \wedge 0,745 \wedge 0,58] = 0,32. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{вкр}}(y_3) = & [0,07 \wedge 0,81 \wedge 1] \vee [0,32 \wedge 0,81 \wedge 1] \vee [0,32 \wedge 0,81 \wedge 0,756] \vee \\ & \vee [0,54 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [0,07 \wedge 0,81 \wedge 0,58] \vee [0,32 \wedge 0,81 \wedge 0,58] \vee \\ & \vee [0,54 \wedge 1 \wedge 1] \vee \\ & \vee [0,792 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [0,54 \wedge 1 \wedge 0,58] \vee [0,792 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee \\ & \vee [0,89 \wedge 0,745 \wedge 0,756] \vee \\ & \vee [0,792 \wedge 0,745 \wedge 0,58] = 0,756. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{в}}(y_3) = & [0,54 \wedge 0,81 \wedge 1] \vee [0,792 \wedge 0,81 \wedge 1] \vee [0,792 \wedge 0,81 \wedge 0,756] \vee \\ & \vee [0,54 \wedge 0,81 \wedge 0,58] \vee [0,792 \wedge 0,81 \wedge 0,58] \vee [0,792 \wedge 1 \wedge 1] \vee [0,89 \wedge 1 \wedge 1] \vee \\ & \vee [0,89 \wedge 0,81] \vee [0,89 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [0,792 \wedge 1 \wedge 0,58] \vee [0,89 \wedge 1 \wedge 0,58] \vee \\ & \vee [0,89 \wedge 0,745 \wedge 1] \vee [0,89 \wedge 0,745 \wedge 0,58] = 0,89. \end{aligned}$$

Підставимо значення функцій належностей у нечіткі логічні рівняння (3.16) – (3.19) й обчислимо ступені належності змінної y_1 (вологозабезпеченість рослин) до термів «нкр», «кр», «вкр» та «в».

$$\begin{aligned} \mu^{\text{нкр}}(y_1) = & [0,2 \wedge 0,752 \wedge 0,26 \wedge 0,54] \vee [0,2 \wedge 0,127 \wedge 0,26 \wedge 0,54] \vee \\ & \vee [0,261 \wedge 0,26] \vee [0,26 \wedge 0,002] \vee [0,26 \wedge 0,008 \wedge 0,54] \vee \\ & \vee [0,2 \wedge 0,752 \wedge 0,261 \wedge 0,26 \wedge 0,008] \vee [0,26 \wedge 0,002 \wedge 0,54] \vee \\ & \vee [0,261 \wedge 0,26 \wedge 0,008 \wedge 0,54] = 0,26. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{KP}}(y_1) &= [0,95 \wedge 0,32] \vee [0,825 \wedge 0,127 \wedge 0,521 \wedge 0,95 \wedge 0,147 \wedge 0,745] \vee \\
&\vee [0,2 \wedge 0,752 \wedge 0,521 \wedge 0,26 \wedge 0,008 \wedge 0,745] \vee \\
&\vee [0,2 \wedge 0,127 \wedge 0,521 \wedge 0,26 \wedge 0,147 \wedge 0,745] \vee \\
&\vee [0,825 \wedge 0,752 \wedge 0,521 \wedge 0,95 \wedge 0,147 \wedge 0,745] \vee \\
&\vee [0,825 \wedge 0,127 \wedge 0,521 \wedge 0,95 \wedge 0,008] \vee \\
&\vee [0,2 \wedge 0,127 \wedge 0,521 \wedge 0,26 \wedge 0,008] \vee \\
&\vee [0,825 \wedge 0,127 \wedge 0,26 \wedge 0,008 \wedge 0,745] = 0,32.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{BKP}}(y_1) &= [0,825 \wedge 0,127 \wedge 1 \wedge 0,756] \vee [1 \wedge 0,95 \wedge 0,147 \wedge 0,756] \vee \\
&\vee [0,327 \wedge 0,95 \wedge 0,756] \vee [0,825 \wedge 0,415 \wedge 1 \wedge 1 \wedge 0,147] \vee \\
&\vee [0,825 \wedge 0,415 \wedge 1 \wedge 1 \wedge 0,147 \wedge 0,745] \vee \\
&\vee [0,825 \wedge 0,206 \wedge 1 \wedge 0,95] = 0,327.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{B}}(y_1) &= [0,327 \wedge 1] \vee [0,206 \wedge 1] \vee [1 \wedge 0,599] \vee [1 \wedge 0,89] \vee \\
&\vee [0,825 \wedge 0,415 \wedge 1 \wedge 1 \wedge 0,147 \wedge 0,756] \vee [1 \wedge 1 \wedge 0,89] = 0,89.
\end{aligned}$$

Підставимо значення функцій належностей у нечіткі логічні рівняння (3.20) – (3.22) й обчислимо ступені належності змінної y_2 (кліматичний фактор) до термів «нсс», «пм» та «спв».

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{нсс}}(y_2) &= [0,098 \wedge 0,9] \vee [1 \wedge 0,22 \wedge 0,9] \vee [0,575 \wedge 0,22 \wedge 0,9] \vee \\
&\vee [0,04 \wedge 0,22 \wedge 0,9] \vee [1 \wedge 0,77 \wedge 0,9] \vee [0,575 \wedge 0,77 \wedge 0,9] \vee \\
&\vee [0,04 \wedge 0,77 \wedge 0,9 \wedge 0,66] \vee [0,04 \wedge 0,77 \wedge 0,9 \wedge 0,106] \vee [0,098 \wedge 0,692] \vee \\
&\vee [1 \wedge 0,22 \wedge 0,692 \wedge 0,106] \vee [0,575 \wedge 0,22 \wedge 0,692 \wedge 0,106] = 0,77.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{пм}}(y_2) = & [0,04 \wedge 0,77 \wedge 0,9 \wedge 0,85] \vee [0,02 \wedge 0,77 \wedge 0,9] \vee [0,186 \wedge 0,692] \vee \\
& \vee [0,04 \wedge 0,692] \vee [1 \wedge 0,22 \wedge 0,692 \wedge 0,66] \vee [1 \wedge 0,77 \wedge 0,692 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [1 \wedge 0,77 \wedge 0,221 \wedge 0,66] \vee [1 \wedge 0,63 \wedge 0,221 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [1 \wedge 0,63 \wedge 0,221 \wedge 0,85] \vee [0,575 \wedge 0,22 \wedge 0,692 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [0,575 \wedge 0,22 \wedge 0,692 \wedge 0,85] \vee [0,575 \wedge 0,77 \wedge 0,692 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [0,575 \wedge 0,77 \wedge 0,692 \wedge 0,85] \vee [0,575 \wedge 0,63 \wedge 0,692 \wedge 0,85] \vee \\
& \vee [0,575 \wedge 0,63 \wedge 0,692 \wedge 0,66] \vee [0,02 \wedge 0,692 \wedge 0,106] \vee \\
& \vee [0,02 \wedge 0,22 \wedge 0,9 \wedge 0,85] = 0,66.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{спв}}(y_2) = & [0,02 \wedge 0,77 \wedge 0,692 \wedge 0,66] \vee [0,02 \wedge 0,22 \wedge 0,221 \wedge 0,85] \vee \\
& \vee [0,04 \wedge 0,77 \wedge 0,221 \wedge 0,66] \vee [0,04 \wedge 0,77 \wedge 0,221 \wedge 0,85] \vee \\
& \vee [0,02 \wedge 0,77 \wedge 0,692 \wedge 0,85] \vee [0,02 \wedge 0,77 \wedge 0,221 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [0,02 \wedge 0,22 \wedge 0,692 \wedge 0,85] \vee [0,04 \wedge 0,22 \wedge 0,221 \wedge 0,85] \vee \\
& \vee [0,04 \wedge 0,22 \wedge 0,221 \wedge 0,66] \vee [0,04 \wedge 0,63 \wedge 0,221 \wedge 0,85] \vee \\
& \vee [0,02 \wedge 0,63 \wedge 0,221] = 0,04.
\end{aligned}$$

Підставимо значення функцій належностей в нечіткі логічні рівняння (3.32) – (3.35) й обчислимо ступені належності змінної y_5 (необхідність поливу) до термів «нп», «осв», «мпн» та «нпн».

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{нп}}(y_5) = & [1 \wedge 0,89] \vee [1 \wedge 0,327 \wedge 0,04] \vee [0,29 \wedge 0,89] \vee \\
& \vee [0,29 \wedge 0,327 \wedge 0,04] \vee \\
& \vee [0,29 \wedge 0,327 \wedge 0,66] \vee [0,03 \wedge 0,89] \vee [1 \wedge 0,03 \wedge 0,327] \vee \\
& \vee [1 \wedge 0,03 \wedge 0,245 \wedge 0,04] \vee [1 \wedge 0,03 \wedge 0,245 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,327 \wedge 0,04] \vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,327 \wedge 0,66] \vee \\
& \vee [1 \wedge 0,02] \vee [0,58 \wedge 0,02 \wedge 0,89] \vee [0,58 \wedge 0,02 \wedge 0,327] \vee \\
& \vee [0,58 \wedge 0,02 \wedge 0,245 \wedge 0,04] = 0,89.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{\text{осв}}(y_5) = & [1 \wedge 0,327 \wedge 0,77] \vee [1 \wedge 0,327 \wedge 0,66] \vee [0,29 \wedge 0,327 \wedge 0,77] \vee \\
& \vee [1 \wedge 0,03 \wedge 0,245 \wedge 0,77] \vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,327 \wedge 0,77] = 0,327.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{\text{МПН}}(y_5) &= [1 \wedge 0,03 \wedge 0,26 \wedge 0,04] \vee [1 \wedge 0,03 \wedge 0,26 \wedge 0,66] \vee \\ &\vee [0,58 \wedge 0,02 \wedge 0,245 \wedge 0,77] \vee [0,58 \wedge 0,02 \wedge 0,245 \wedge 0,66] \vee \\ &\vee [0,58 \wedge 0,02 \wedge 0,26] \vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,245 \wedge 0,04] \vee \\ &\vee [0,29 \wedge 0,745 \wedge 0,04] = 0,04.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{\text{НПН}}(y_5) &= [1 \wedge 0,245] \vee [1 \wedge 0,26] \vee [0,29 \wedge 0,245 \wedge 0,77] \vee \\ &\vee [0,29 \wedge 0,245 \wedge 0,66] \vee [0,29 \wedge 0,26] \vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,245 \wedge 0,77] \vee \\ &\vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,245 \wedge 0,66] \vee [0,58 \wedge 0,03 \wedge 0,26] \vee \\ &\vee [1 \wedge 0,03 \wedge 0,26 \wedge 0,77] = 0,26.\end{aligned}$$

Підставимо значення функцій належностей у нечіткі логічні рівняння (3.27) – (3.31) й обчислимо ступені належності змінної y_4 (найменша вологоємність) до термів «н», «нс», «с», «вс» та «в».

$$\begin{aligned}\mu^{\text{H}}(y_4) &= [0,13 \wedge 0,8 \wedge 0,272 \wedge 0,798] \vee [0,13 \wedge 0,8 \wedge 0,272 \wedge 0,34] \vee \\ &\vee [0,02 \wedge 0,8 \wedge 0,21 \wedge 0,34] \vee [0,63 \wedge 0,8 \wedge 0,272 \wedge 0,34] \vee \\ &\vee [0,63 \wedge 0,8 \wedge 0,271 \wedge 0,798] = 0,272.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{\text{HC}}(y_4) &= [0,13 \wedge 0,91 \wedge 0,21 \wedge 1] \vee [0,63 \wedge 0,91 \wedge 0,21 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,02 \wedge 0,91 \wedge 0,21 \wedge 0,798] \vee [0,06 \wedge 0,91 \wedge 0,21 \wedge 0,798] = 0,21.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{\text{C}}(y_4) &= [0,5 \wedge 0,91 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,5 \wedge 1 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,86 \wedge 1 \wedge 0,894 \wedge 1] \vee \\ &\vee [1 \wedge 0,91 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,63 \wedge 1 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,5 \wedge 1 \wedge 0,894 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,8 \wedge 0,512 \wedge 0,894 \wedge 1] = 0,86.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{\text{BC}}(y_4) &= [1 \wedge 0,91 \wedge 0,894 \wedge 1] \vee [1 \wedge 1 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,6 \wedge 0,512 \wedge 0,894 \wedge 1] \vee [0,6 \wedge 1 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,86 \wedge 0,512 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,8 \wedge 1 \wedge 0,894 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,8 \wedge 0,512 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,5 \wedge 0,561 \wedge 0,894 \wedge 1] = 0,894.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^B(y_4) &= [0,6 \wedge 0,561 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [1 \wedge 0,561 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,8 \wedge 0,429 \wedge 0,03 \wedge 1] \vee [0,8 \wedge 0,561 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee \\ &\vee [0,86 \wedge 0,561 \wedge 0,32 \wedge 1] \vee [0,6 \wedge 0,429 \wedge 0,03 \wedge 1] = 0,32.\end{aligned}$$

Підставимо знайдені ступені належностей у нечіткі логічні рівняння (3.7) – (3.15), що визначають діагноз поливу:

$$\mu^{d_1}(D) = [0,32 \wedge 0,89] \vee [0,894 \wedge 0,89] \vee [0,86 \wedge 0,89] = 0,86.$$

$$\mu^{d_2}(D) = [0,21 \wedge 0,89] \vee [0,272 \wedge 0,89] = 0,272.$$

$$\mu^{d_3}(D) = 0,327.$$

$$\mu^{d_4}(D) = 0,04 \wedge 0,823 = 0,04.$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_5}(D) &= [0,04 \wedge 0,53] \vee [0,04 \wedge 0,051] \vee [0,272 \wedge 0,26 \wedge 0,823] \vee \\ &\vee [0,21 \wedge 0,6 \wedge 0,823] = 0,26.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_6}(D) &= [0,272 \wedge 0,26 \wedge 0,53] \vee [0,21 \wedge 0,26 \wedge 0,53] \vee [0,86 \wedge 0,26 \wedge 0,53] \vee \\ &\vee [0,894 \wedge 0,26 \wedge 0,53] = 0,26.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_7}(D) &= [0,272 \wedge 0,26 \wedge 0,051] \vee [0,21 \wedge 0,26 \wedge 0,051] \vee \\ &\vee [0,32 \wedge 0,26 \wedge 0,823] \vee [0,86 \wedge 0,26 \wedge 0,53] = 0,26.\end{aligned}$$

$$\mu^{d_8}(D) = [0,894 \wedge 0,26 \wedge 0,53] \vee [0,32 \wedge 0,26 \wedge 0,53] = 0,26.$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_9}(D) &= [0,86 \wedge 0,26 \wedge 0,051] \vee [0,894 \wedge 0,26 \wedge 0,051] \vee \\ &\vee [0,32 \wedge 0,26 \wedge 0,051] = 0,051.\end{aligned}$$

У результаті отримали наступну нечітку множину:

$$D = \left(\frac{0,86}{d_1}, \frac{0,272}{d_2}, \frac{0,327}{d_3}, \frac{0,04}{d_4}, \frac{0,26}{d_5}, \frac{0,26}{d_6}, \frac{0,26}{d_7}, \frac{0,26}{d_8}, \frac{0,051}{d_9} \right).$$

Серед можливих варіантів поливу обираємо рішення з максимальним значенням функції належності – рішення d_1 «полив не потрібний, наступне діагностування через 6 – 7 днів».

3.8. Нечіткий регресійний механізм прийняття рішень при визначенні параметрів режимів зрошення

Розглянемо технологію оцінювання ступеня доцільності прийняття рішення щодо визначення строків та норм поливу з використанням апарату нечітких регресій, загальна методика якого була описана у 2-му розділі. Реалізація запропонованої технології забезпечується шляхом розв'язання окремих задач.

1) Для кожної із змінних $x_1 - x_{19}$ було сформовано набір функцій належності $\mu_j(x_i)$ контрольованої змінної x_i , $i = \overline{1, 19}$, $j = \overline{1, 9}$ нечіткій множині значень, сприятливих для реалізації кожного з 9-ти варіантів поливу, у вигляді дзвіноподібної функції з двома параметрами: координатою максимуму та коефіцієнтом розтягування на основі статистичної обробки інформації, отриманої від групи експертів.

При анкетуванні групи із 7-ми експертів визначалась їх думка про сприятливість значень вхідних змінних до кожного із 9-ти класів рішень щодо проведення поливів. Значення функцій належності визначалось як відносна

частота появи значення за формулою: $\mu_j(x_i) = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 a_{ji}^k$, $i = \overline{1, 19}$, $j = \overline{1, 9}$, де

a_{ji}^k – думка k -го експерта про сприятливість значення вхідної змінної x_i до j -го класу рішення.

Параметри функцій належності контрольованих змінних по кожному із класів рішень представлено у додатку Б.

2) Отримані 9 векторів-оцінок параметрів рівняння регресії методом найменших квадратів, в якому для визначення діагнозу поливу при певному наборі контрольованих параметрів використана описана вище методика складання і розв'язання системи нечітких логічних рівнянь.

Розв'язання поставлених задач дозволило отримати 9 рівнянь регресії за кожним із діагнозів.

Для описів функцій належності нечітких чисел використовувались моделі $(L - R)$ -типу, що визначаються простотою виконання операцій алгебри над відповідними нечіткими числами [79]. Дзвіноподібна функція належності, що використовувалась для вхідних змінних, симетрична відносно координати максимуму, тому шляхом переходу у співвідношенні (2.36) від функції належності $(L - R)$ -типу до дзвіноподібної функції належності із заміною відповідних позначень отримаємо ступені доцільності використання кожного з 9-ти варіантів поливу

$$\mu_j(X) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^{19} \hat{a}_i^j b_i^j + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^n \hat{a}_{i_1 i_2}^j b_{i_1}^j b_{i_2}^j - y_j}{\sum_{i=1}^{19} \hat{a}_i^j c_{ij} + \sum_{i_1=1, i_2 \neq i_1}^{19} \hat{a}_{i_1 i_2}^j (b_{i_1}^j c_{i_2 j} + b_{i_2}^j c_{i_1 j})} \right)^2}. \quad (3.49)$$

Прийняття рішень при виборі одного з 9-ти класів рішень щодо проведення поливу будемо здійснювати за наступним алгоритмом:

1. Зафіксувати значення параметрів, що визначають стан зрошуваного поля $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{19}^*)$.

2. Підставити значення вхідних змінних $x_1 - x_{19}$ у співвідношення (3.49) і розрахувати ступені доцільності використання кожного з 9-ти варіантів поливу:

$$\mu_j(X^*) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^{19} \hat{a}_i^j b_i^j + \sum_{i_1=l_2 \neq i_1}^n \sum_{i_2} \hat{a}_{i_1 i_2}^j b_{i_1}^j b_{i_2}^j - \left(\sum_{i=1}^{19} \hat{a}_i^j x_i^* + \sum_{i_1=l_2 \neq i_1}^{19} \sum_{i_2} \hat{a}_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^* x_{i_2}^* \right)}{\sum_{i=1}^{19} \hat{a}_i^j c_{ij} + \sum_{i_1=l_2 \neq i_1}^{19} \sum_{i_2} \hat{a}_{i_1 i_2}^j (b_{i_1}^j c_{i_2 j} + b_{i_2}^j c_{i_1 j})} \right)^2} \quad (3.50)$$

3. Як діагноз поливу обрати той з 9-ти класів рішень $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9$, ступінь доцільності якого за ситуації, коли набір контрольованих параметрів утворює вектор X^* , є найбільшим.

У випадку, коли вхідна змінна x_i задається якісно одним із термів, як значення x_i^* вибирається координата максимуму функції належності відповідного терму.

Запропонована методика дозволяє для будь-якого набору контрольованих параметрів розрахувати ступінь доцільності використання кожного з 9-ти можливих варіантів поливу та вибрати той з них, ступінь доцільності якого є найбільшим.

Перевірка адекватності запропонованої моделі прийняття рішень при визначенні строків та норм поливу на основі нечіткого регресійного механізму за методикою з пункту 3.6 дозволила отримати 96,6% правильних діагнозів щодо вибору варіанта поливу.

Висновки за розділом 3

1. Описано ґрунтові, кліматичні, морфологічні та фізіологічні характеристики, що впливають на визначення строків і норм поливів, виділено 9 типів діагностичних рішень.

2. Побудовано ієрархічне дерево логічного висновку і проведено формалізацію частинних параметрів стану лінгвістичними змінними. У результаті згортання частинних параметрів стану отримано 5 укрупнених, які було формалізовано лінгвістичними змінними. Показано, що загальна

кількість частинних параметрів стану, які необхідні для визначення діагнозу поливу, дорівнює 19.

3. Експертні знання, що описують зв'язок між параметрами стану та вихідною змінною – діагнозом поливу, представлено нечіткими базами знань, в яких запропоновано правила «неповного» формату, що дозволило скоротити обсяг правил у базах знань до 217. Розроблено ієрархічну систему моделей на основі дерева логічного висновку та побудовано алгоритм прийняття рішень на базі нечіткого логічного висновку.

4. Описано методику навчання нечіткої моделі за допомогою генетичних алгоритмів та проведено параметричну ідентифікацію за допомогою настроювання параметрів функцій належності.

5. Сформовано функції належності $\mu_j(x_i)$ контрольованої змінної x_i , $i = \overline{1, 19}$ нечіткій множині значень, сприятливих для реалізації кожного з 9-ти варіантів поливу, у вигляді дзвіноподібної функції з двома параметрами: координатою максимуму та коефіцієнтом розтягування. Отримано 9 векторів-оцінок параметрів рівняння регресії та запропоновано алгоритм прийняття рішення з використанням математичного апарату нечітких регресій.

РОЗДІЛ 4

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ

Розділ містить опис системи підтримки прийняття рішень з визначення параметрів режимів зрошення, яка реалізує моделі й алгоритми діагностування поливів на основі нечіткого регресійного механізму прийняття рішень.

4.1. Система нечіткого регресійного механізму логічного висновку

Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень з визначення параметрів режимів зрошення розроблена на основі діагностичних моделей та алгоритмів, які розглянуто в розділі 3.

Розробка системи підтримки прийняття рішень виконувалась на базі системи FUZZY EXPERT під операційні системи Windows. Використання нечіткої експертної системи FUZZY EXPERT зумовлено необхідністю розрахунку функцій належності рішення до кожного із 9-ти діагнозів поливу для реалізації можливості знаходження параметрів рівнянь регресії.

FUZZY EXPERT складається із двох основних частин: програмного середовища, що дозволяє будувати системи підтримки прийняття рішень у вибраній предметній галузі, і експертної системи, яка є кінцевим продуктом [83].

Структура розробленої системи підтримки прийняття рішень з визначення строків та норм поливу, на відміну від FUZZY EXPERT, містить додатковий головний блок, що реалізує нечіткий регресійний механізм логічного висновку.

На основі обробки 19-ти факторів, що визначають необхідність у зрошенні, система визначає ступені доцільності використання кожного із 9-ти класів рішень щодо проведення поливу. Обирається те рішення, ступінь доцільності якого при певному векторі вхідних параметрів є найбільшим.

Структуру системи нечіткого регресійного механізму логічного висновку показано на рис. 4.1. Вона побудована на основі системи нечіткого логічного висновку [106] та містить наступні модулі:

1. «Фазифікатор», який здійснює перетворення 19-ти вимірних значень факторів, що визначають необхідність зрошення, у значення ступенів належності до їх нечітких термів.

2. «Нечітка база знань», що містить експертні знання у вигляді лінгвістичних правил типу «ЯКЩО – ТОДІ».

3. «Функції належності», які задані в аналітичному вигляді та дозволяють представляти лінгвістичні терми як нечіткі множини.

4. «Машина нечіткого висновку», яка за нечіткою базою знань визначає діагноз поливу у вигляді нечіткої множини при певному векторі вхідних змінних.

5. «Дерево логічного висновку», що відображає ієрархічний зв'язок між вхідними змінними та вихідною величиною – класом рішення.

6. «Нечіткий регресійний механізм логічного висновку», який визначає найбільш можливе рішення про необхідність зрошення з нечіткої множини рішень, що є розв'язком рівняння регресії для різних варіантів поливу.

7. «Підсистема пояснення» обґрунтовує вибір рішення про полив шляхом визначення змінних, які здійснили найбільш вагомий вплив на процес прийняття рішення.

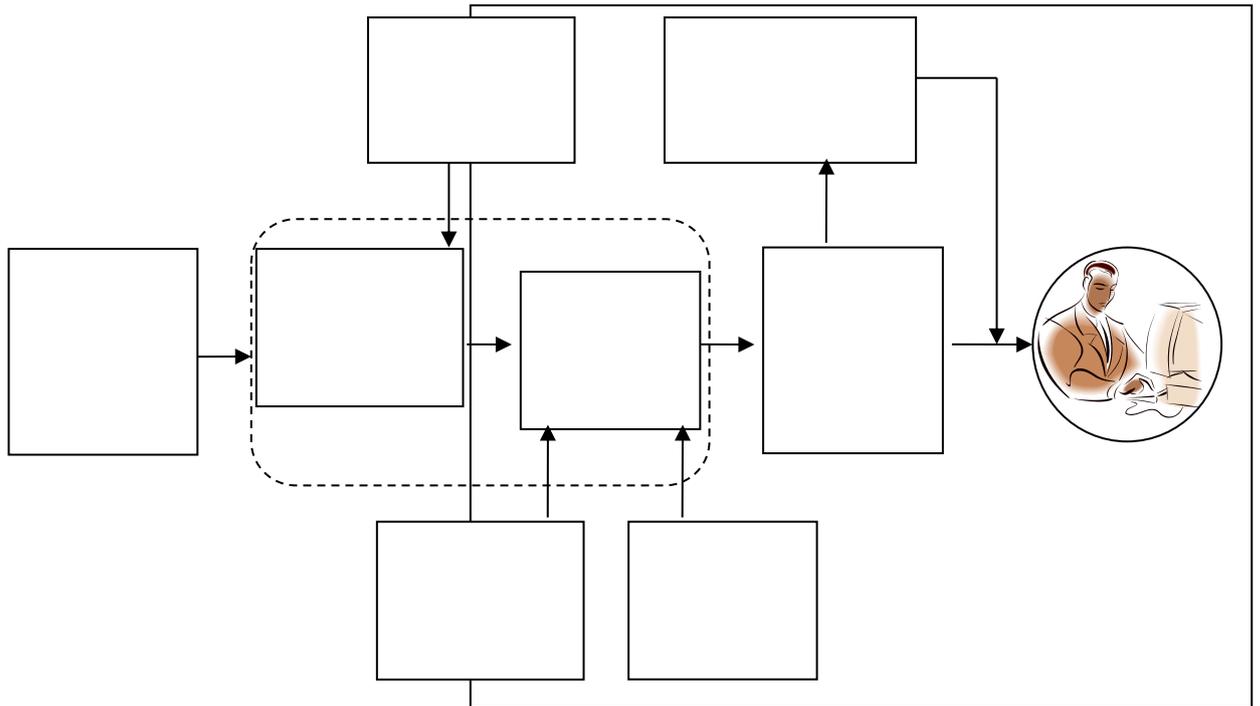


Рис. 4.1. Система нечіткого регресійного механізму логічного висновку

4.2. Принципи роботи системи підтримки прийняття рішень з визначення параметрів режимів зрошення

У головному вікні системи наведені фактори, що визначають необхідність поливу, та відповідні класи рішень. Шляхом натискання на вузол, що відповідає вхідній змінній, можна продивитись її характеристики: універсальну множину цієї змінної та параметри функцій належності. Діалогове вікно функцій належностей вхідної змінної показано на рис 4.2.

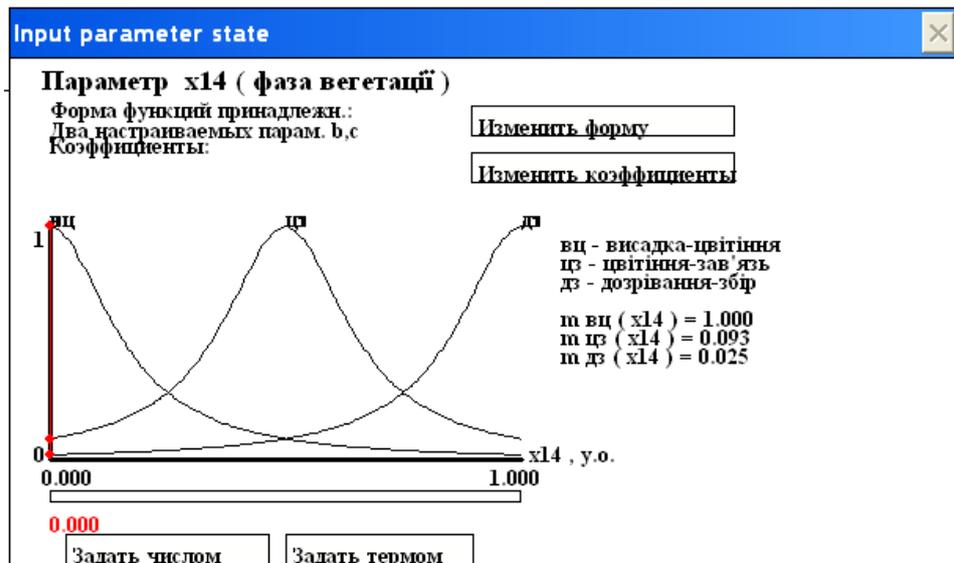


Рис. 4.2. Діалогове вікно функцій належностей вхідної змінної

Значення вхідних змінних при виконанні розрахунків можуть бути задані кількісно та якісно одним із трьох способів: числом, лінгвістичним термом або за принципом термометра. Відповідне діалогове вікно наведено на рис. 4.3.

Входные переменные

Задать значения входным переменным

x1	нкр		Числом	Термом		
x2	бо		Числом	Термом		
x3	25.000000	м	Числом	Термом	0.000000	30.000000
x4	20.000000	мм	Числом	Термом	0.000000	50.000000
x5	0.458065	у.о.	Числом	Термом	0.000000	1.000000
x6	0.600000	у.о.	Числом	Термом	0.000000	1.000000

Просчитать дерево Cancel Последующий

Рис. 4.3. Вікно введення значень вхідних змінних

Значення вхідних змінних визначаються з різним ступенем точності залежно від можливостей господарств: наявності метеопосту, вимірювальних приладів різного типу дії, інформації про мінливість ґрунтових характеристик у межах зрошуваного масиву. У випадках, коли відсутня можливість уведення значень окремих вхідних змінних у систему безпосередньо при визначенні, пропонується їх фіксувати на папері наступним чином:

- x_3 – рівень ґрунтових вод, числом _____ $[0, 30]$, м, або термом _____ «близько (б)» (до 2 м), «середньо (с)» (біля 4 м), «глибоко (г)» (більше 7 м);
- x_4 – опади за поточний період, числом _____ $[0, 100]$, мм, або термом _____ «немає (н)» (біля 0 мм), «незначні (нз)» (біля 5 мм), «достатні (д)» (біля 15 мм), «рясні (р)» (більше 20 мм);
- x_5 – плач, термом _____ «негативний (нг)», «немає (н)», «позитивний (п)»;
- x_6 – тургор листів, термом _____ «ослаблений (ос)», «середній (ср)», «нормальний (н)»;
- x_7 – концентрація клітинного соку, числом _____ $[0, 20]$, %, або термом _____ «низька (н)» (біля 5%), «нижче за критичну (нкp)» (біля 7%), «критична (кp)» (біля 8,2%), «вище за критичну (вкp)» (більше 10%);
- x_8 – вологість ґрунту від НВ, числом _____ $[0, 100]$, %, або термом _____ «низька (н)» (біля 55% та менше), «нижче за середню (нс)» (біля 60%), «трохи нижче за середню (тнс)» (біля 65%), «середня (с)» (біля 70%), «трохи вище за середню (твс)» (біля 75%), «вище за середню (вс)» (біля 80%), «висока (в)» (більше 85%);
- x_9 – прогноз опадів, аналогічно до x_4 ;
- x_{10} – температура повітря, числом _____ $[0, 50]$, °C;
- x_{11} – вологість повітря, числом _____ $[0, 100]$, %, або термом _____ «низька (н)» (біля 45% та менше), «середня (с)» (біля 65%), «висока (в)»

(більше 75%);

- x_{12} – швидкість вітру, числом _____ $[0,15]$, м/с, або термом _____ «низька (н)» (біля 0 м/с), «середня (с)» (біля 4 м/с), «висока (в)» (більше 6 м/с);
- x_{17} – щільність ґрунту, числом _____ $[1,1, 1,7]$, т/м³, або термом _____ «низька (н)» (біля 1,23 т/м³), «нижче за середню (нс)» (біля 1,3 т/м³), «середня (с)» (біля 1,35 т/м³), «вище за середню (вс)» (біля 1,45 т/м³), «висока (в)» (більше 1,5 т/м³);
- x_{19} – глибина активного шару ґрунту, числом _____ $[0, 2]$, м, або термом _____ «мала (м)» (біля 0,25 м), «середня (с)» (біля 0,45 м), «велика (в)» (більше 0,55 м).

Для вибору рішення щодо проведення поливу необхідно натиснути кнопку <Просчитать> у вікні введення значень вхідних змінних (рис. 4.3). У результаті розрахунку за 9-ма рівняннями регресії отримуються ступені доцільності використання кожного із 9-ти рішень. Результати прийняття рішень подаються у текстовій та графічній формі: відповідне діалогове вікно містить інтерпретований результат та діаграму розподілення можливостей за усіма видами діагнозу.

Результати висновку та значення вхідних змінних, що визначили рішення щодо проведення поливу, можна записати у файл шляхом вибору режиму <Задокументировать> у головному меню системи. Діалогове вікно документування роботи системи наведено на рис. 4.4.

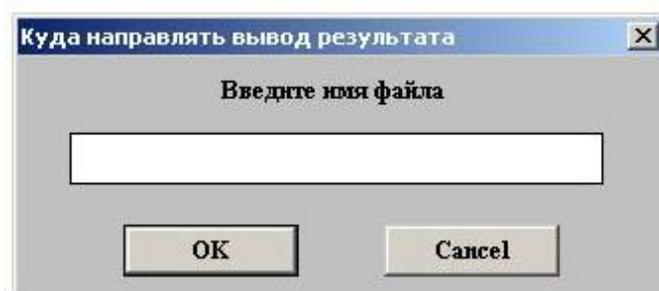
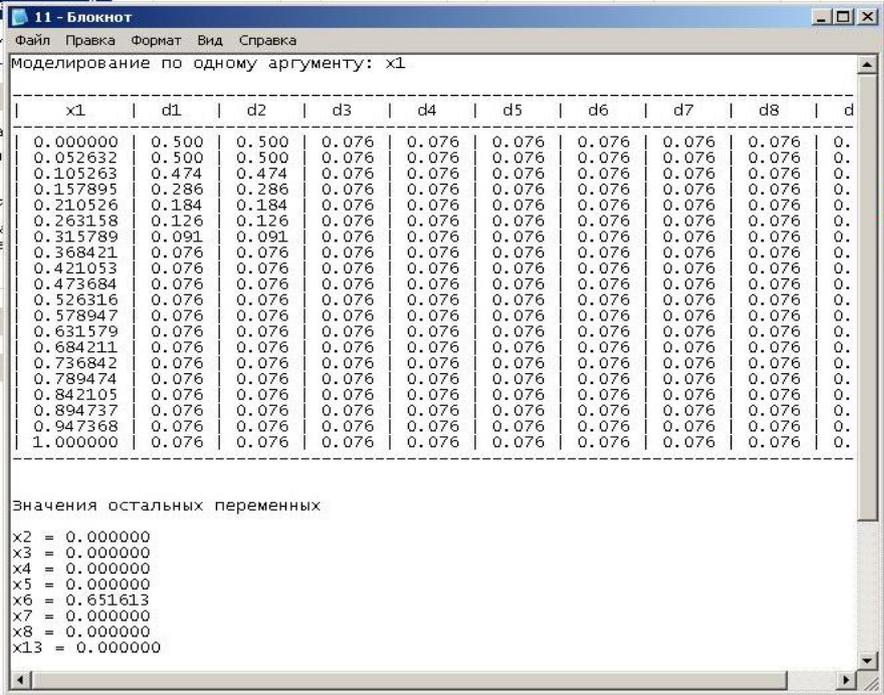


Рис. 4.4. Вікно документування роботи системи

Якщо необхідно, можна простежити за чутливістю отриманого рішення до зміни фіксованого параметра. Динаміка зміни вхідної величини визначається числом точок, у яких був виконаний експеримент. Така необхідність може виникати при прогнозуванні проведення наступних поливів. Проведення такого аналізу можна здійснити шляхом вибору пункту <Моделирование по одному параметру> меню <Моделирование>. Як приклад на рис 4.5 наведені результати аналізу чутливості рішень до зміни фактора x_1 при діагностуванні поля томатів.



x1	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d
0.000000	0.500	0.500	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.052632	0.500	0.500	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.105263	0.474	0.474	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.157895	0.286	0.286	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.210526	0.184	0.184	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.263158	0.126	0.126	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.315789	0.091	0.091	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.368421	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.421053	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.473684	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.526316	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.578947	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.631579	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.684211	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.736842	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.789474	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.842105	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.894737	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
0.947368	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.
1.000000	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.

Значения остальных переменных

x2 = 0.000000
x3 = 0.000000
x4 = 0.000000
x5 = 0.000000
x6 = 0.651613
x7 = 0.000000
x8 = 0.000000
x13 = 0.000000

Рис. 4.5. Вікно аналізу чутливості рішень

4.3. Порівняльний аналіз результатів досліджень

Порівняльний аналіз існуючих підходів по визначенню строків і норм поливу представлено у вигляді діаграми (рис. 4.6) та таблиці (табл. 4.1), що дає можливість зробити висновок про доцільність упровадження в сучасних умовах розробленої системи підтримки прийняття рішень з визначення строків і норм поливів.

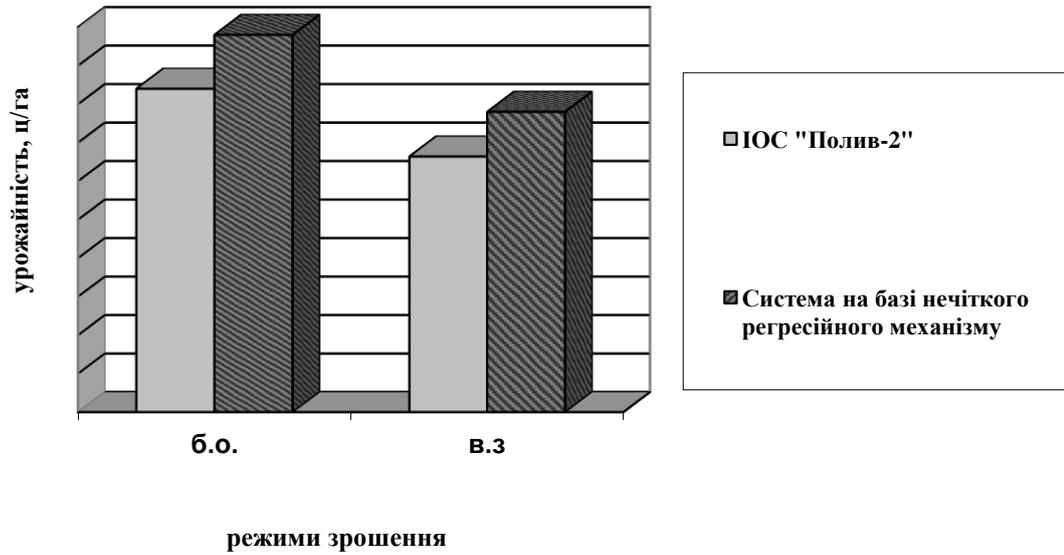


Рис. 4.6. Урожайність томатів при біологічно оптимальному (б.о.) та водозберігаючому (в.з.) режимах зрошення

Таблиця 4.1

Порівняльний аналіз методів діагностування поливів

Труднощі врахування вхідної інформації	Методи визначення ґрунтової вологи	Методи визначення фізіологічних та морфологічних ознак	ІОС «Полив-2»	Система на базі нечіткого регресійного механізму
ґрунтових факторів	+/-	+/-	-	-
фізіологічних та морфологічних факторів	+	-	+	-
кліматичних факторів	+	+	-	-
якісної інформації	+	+/-	+/-	-
нечіткої інформації	+	+	+	-

«+» – наявність труднощів; «-» – відсутність труднощів; «+/-» – часткові труднощі.

4.4. Висновки за розділом 4

1. Побудовано систему підтримки прийняття рішень при діагностуванні поливів, яка ґрунтується на запропонованих у попередніх розділах моделях та алгоритмах. Вона забезпечує інтелектуальну підтримку прийняття рішень при визначенні параметрів режиму зрошення.

2. Розроблена система підтримки прийняття рішень дозволяє суттєво скоротити час, необхідний для проведення розрахунків при визначенні строків і норм поливу загальноприйнятими методами, урахувати всі можливі фактори, що впливають на визначення діагнозу, та їх взаємодії, проводити ранжування можливих діагнозів при визначенні параметрів режимів зрошення на основі аналізу 19-ти параметрів стану. Також цей програмний продукт дає можливість точніше визначати строки та норми поливу порівняно з існуючими методами без трудомістких розрахунків.

3. Запропонована методика дозволяє використовувати розроблену систему підтримки прийняття рішень без спеціальної підготовки в області нечіткого моделювання та програмування, що задовольняє вимоги сучасного зрошувального землеробства.

ВИСНОВКИ

У цій роботі розв'язано науково-практичну задачу оцінювання ступеня доцільності вибору певного рішення за рахунок використання нечітких баз знань і рівняння регресії, що дозволяє формалізувати й автоматизувати процес прийняття рішень при діагностуванні поливів з урахуванням великої кількості параметрів, що впливають на об'єкт, і попарних зв'язків між ними.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз методів визначення причинно-наслідкових зв'язків між вхідними та вихідною змінними, методів оперативного планування зрошення. У результаті визначено проблеми, що потребують розроблення нової інформаційної технології та систем підтримки прийняття рішень у зрошуваному землеробстві.

2. Розглянуто можливості застосування теорії нечітких множин при визначенні діагностичного рішення. Проведено аналіз недоліків класичного логічного висновку на основі багатовимірної бази знань. Запропоновано методику оцінювання ступеня доцільності вибору певного рішення з використанням апарату нечіткої математики та регресійного аналізу, яка має наступні переваги: дозволяє розрахувати ступені доцільності використання різних варіантів рішень для певного набору контрольованих параметрів; забезпечує можливість урахування відмінностей за важливістю контрольованих параметрів після проведення попереднього навчання. Реалізація методики не вимагає зберігання громіздкої багатовимірної бази знань, методика надає можливість при розрахунку ступеня доцільності вибору рішення враховувати не тільки значення факторів, що впливають на прийняття рішення, але і їх взаємодії необхідного порядку.

3. Визначено параметри, що впливають на точність діагностування строків та норм поливів, і для кожного з них вибрано терми для лінгвістичної оцінки та інтервали, яким належать їх значення. Вибір параметрів стану

зумовлений безпосереднім впливом кожного з них на визначення діагнозу поливу і можливістю їх застосування чи вимірювання. Проведено класифікацію діагнозів за строками та нормами поливів у залежності від вологозабезпеченості рослин. Запропонована диференціація строків та норм поливу дозволяє за можливістю відтермінувати наступний полив, а розбиття поливної норми на інтервали відокремлює різні стани вологозабезпеченості рослин і визначає їх потребу у воді.

4. Проведено ієрархічну класифікацію параметрів у вигляді дерева логічного висновку, що пов'язує фактори, які впливають на визначення параметрів режимів зрошення, з можливим діагнозом поливу. За допомогою дерева логічного висновку побудовано нечіткі бази знань.

5. Розроблено математичну модель й алгоритм діагностування строків та норм поливів на базі нечіткої логіки для реалізації нечіткого регресійного механізму. У діагностичній моделі зв'язок між факторами, що впливають на вибір правильного рішення, і діагнозом поливу представлено лінгвістичними правилами «ЯКЩО – ТОДІ» у вигляді нечітких баз знань. Після побудови первинної моделі проведено параметричну ідентифікацію моделі діагностування шляхом настроювання параметрів функцій належності термів лінгвістичних змінних.

6. Розроблено інтелектуальну інформаційну технологію оцінювання ступеня доцільності використання варіантів поливу на основі регресійного механізму логічного висновку за рахунок використання нечітких баз знань і рівняння регресії. Отримано 9 рівнянь регресії, які дозволяють приймати рішення стосовно вибору адекватного діагнозу поливу.

7. На основі запропонованої нечіткої регресійної моделі розроблено систему підтримки прийняття рішень при діагностуванні параметрів режимів зрошення, яка працює під операційними системами Windows і не потребує спеціальної підготовки.

8. Систему підтримки прийняття рішень щодо формування режимів зрошення впроваджено у процес визначення строків та норм поливу при

зрошенні овочевих культур сімейства пасльонових. Розроблена система підтримки прийняття рішень дозволяє залежно від вибору режиму зрошення визначати потребу рослин у воді і отримувати високі врожаї на фоні раціонального використання води, або заощаджувати водні ресурси при певних втратах врожаю, що з економічної точки зору є доцільним порівняно з витратами на подачу додаткових об'ємів поливної води для досягнення максимальних врожаїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Актуальні проблеми фізіології водного режиму та посухостійкості рослин: [зб. наукових праць, присвячених пам'яті Шматька І.Г. / НАН України; Інститут фізіології рослин і генетики / ред. Моргун В.В.] – К.: Міжнар. фін. агенція, 1997. – 95 с.
2. Алиев Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Алиев Р.А., Абдикеев Н.М., Шахназаров М.М. – М: Радио и связь, 1990. – 264 с.
3. Алпатьев А.М. Влагообороты в природе и их преобразование / Алпатьев А.М. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 324 с.
4. Алпатьев С.М. Методические указания по расчетам режимов орошения сельскохозяйственных культур на основе биоклиматического метода / Алпатьев С.М. – К.: Минводхоз СССР, УкрНИИГиМ, 1967. – 109 с.
5. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – Тюмень: Тюменский государственный университет, 2000. – 352 с.
6. Аронская Л.А. Язык растений. Как по внешнему виду растений определять их потребности в воде, свете, воздухе, тепле и питании. / Аронская Л.А. – Петропавловск-Камчатский: Холдинговая компания «Новая книга», 2001. – 128 с.
7. Баховець Б.О. Основи автоматизації і автоматизація виробничих процесів в гідромеліорації / Баховець Б.О. – Рівне, 1997. – 184с.
8. Белкин А.Р. Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации / Белкин А.Р., Левин М.Ш. – М.: Наука, 1990. – 320 с.
9. Благодатний В.І. Ресурсозберігаюча організація зрошуваного землеробства / В. Благодатний, П. Ковальчук. – К.: Урожай, 1991. – 80 с.
10. Блюмин С.Л. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности / С.Л. Блюмин, И.А. Шуйкова. – Липецк: ЛЭГИ, 2001. – 138 с.

11. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей / Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
12. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов: учебник [для студ. вузов по спец. 311400 «Электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства»] / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник – М.: Колос, 2003. – 344 с.
13. Вергунов В.А. Основы математического моделирования: для анализа и прогноза агрономич. процессов / Вергунов В.А., Вергунова И.Н., Шкрабак В.С. – СПб.: СПбГАУ, 2003. – 219 с.
14. Гикало Г.С. Общее овощеводство: учеб. пособие по лекционному курсу «Овощеводство» для студ. аграр. спец. / Гикало Г.С. – Краснодар: КГАУ, 2000. – 187 с.
15. Григоров С.М. Научные основы ресурсосбережения при дождевании / Григоров С.М. – М.: ФГНУ ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2001. – 135 с.
16. Гропп Д. Методы идентификации систем / Гропп Д. [пер. с нем.]. – М.: Мир, 1979. – 199 с.
17. Джулай А.П. Водопотребление и режим орошения сельскохозяйственных культур / Джулай А.П. – Краснодар, 1976. – 221 с.
18. Елти Дж. Экспертные системы: концепции и примеры / Дж. Елти, М. Кумбс. – М.: Мир, 1987. – 215 с.
19. Жовтоног О.І. Історія, стан та напрямки розвитку інформаційно-обчислювальних систем планування зрошення / О.І. Жовтоног, Л.А. Філіпенко, Т.Ф. Деменкова // Меліорація і водне господарство. – 2004. – № 90. – С. 29 – 50.
20. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Заде Л.; [пер. с англ.] – М.: Мир, 1976. – 167 с.
21. Зайдельман Ф.Р. Мелиорация почв: учебник для студ. вузов по спец. «Почвоведение», «Мелиорация, рекультивация и охрана земель». – 2 изд., доп. и перераб. / Зайдельман Ф.Р. – М.: Изд. Моск. ун-та, 1996. – 384 с.

22. Землеробство в умовах недостатнього зволоження: [наукові та практичні висновки]. – К.: Аграрна наука, 2000. – 80 с.
23. Зінчук П.Й. Грунтознавство: курс лекцій із грунтознавства та географії ґрунтів [для студ. спец. 7070501 «Географія» і 7070801 «Екологія та охорона навколишнього середовища» ден. і заоч. форм навч.] / П.Й. Зінчук, М.І. Зінчук. – Луцьк: РВВ «Вежа» ВДУ ім. Лесі Українки, 2006. – 180 с.
24. Змитрович А.И. Интеллектуальные информационные системы. — Минск: НТООО «ТетраСистемс», 1997. – 367 с.
25. Инструкция по оперативному планированию поливов сельскохозяйственных культур по дефициту влагозапасов / Под ред. Цывинского Г.В. – К.: Минводхоз УССР, 1988. – 29 с.
26. Инструкция по оперативному планированию поливов сельскохозяйственных культур. / Под ред. В.П. Остапчика. – К.: Минводхоз УССР, 1982. – 66 с.
27. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів: навч. посіб.: для студ. спец. 8.092501 «Автоматизовані системи управління технологічними процесами» [уклад.: Б. Кузьменко, В. Лисенко]. – К., 2007. – 139 с.
28. Кабашникова Л.Ф. Методы оценки физиологического состояния растений в условиях засухи: практ. пособие / Кабашникова Л.Ф., Пшибытко Н.Л., Абрамчик Л.М. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 42 с.
29. Калантиренко І.І. Інститут гідротехніки і меліорації: заснування, розвиток та найважливіші наукові досягнення за 75 років / Калантиренко І.І., Загайчук А.С. – К.: ПоліграфКонсалтинг, 2005. – 171 с.
30. Кательников Д.И. Разработка метода идентификации нелинейных объектов для принятия решений на базе нечеткой логики: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Кательников Д.И. – Винница, 1998. – 195 с.
31. Коваленко П.І. Раціональне використання води на меліорованих землях / П.І. Коваленко, Ю.О. Михайлов. – К.: Урожай, 1986. – 184 с.
32. Коваленко П.І. Раціональне використання води при зрошенні / П.І. Коваленко, Ю.О. Михайлов. – К.: Аграрна наука, 2000. – 154 с.

33. Ковальчук П.І. Оцінка ефективності ресурсозберігаючих режимів зрошення на основі математичного моделювання / Ковальчук П.І., Михальська Т.О., Ковальчук В.П. // Меліорація і водне господарство. – 1998. – № 85. – С. 29 – 36.
34. Ковальчук П.І. Математичне моделювання урожайності овочевих культур для оптимізації водокористування при зрошенні в умовах погодного ризику / Ковальчук П.І., Пендак Н.В. // Меліорація і водне господарство. – 2004. – № 91. – С.83 – 91.
35. Ковальчук П.І. Оптимізація водокористування на основі САПР в умовах проведення земельної реформи / Ковальчук П.І., Пендак Н.В., Прудська А.О., Волошин М.М. // Актуальні питання розвитку земельної реформи в Україні: стан та перспективи. – Херсон, 2003. – С. 152 – 155.
36. Козин М.А. Водный режим почвы и урожай / Козин М.А. – М.: Колос, 1977. – 303 с.
37. Концептуальні основи сталого розвитку водогосподарського комплексу України / [С.І. Дорогунцов, М.А. Хвесик та ін.]. – К., 1996. – 56 с.
38. Копотун І.А. Кібернетика на службі АПК: літературно-публіцистична повість / Копотун І.А. – Полтава, 2007. – 496 с.
39. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / Кофман А.; [пер. с англ.]. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
40. Кривов В.М. Екологічно безпечне землекористування Лісостепу України. Проблема охорони ґрунтів / Кривов В.М. – К.: Урожай, 2006. – 302 с.
41. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / Круглов В.В., Дли М.И., Голубов Р.Ю. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
42. Кучерявий В.Ф. Овочівництво: навч. посіб. для студ. природничих ф-тів вищих пед. навч. закладів / Кучерявий В.Ф. – К.: АТ «Віпол», 1999. – 328 с.
43. Леви Л.И. Диагностика поливов на основе нечеткой модели / Леви Л.И., Тащилин М.В. // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – 2007. – Науковий журнал №2 (15) частина 1. – С. 86 – 88.

44. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / Леоненков А.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
45. Леві Л.І. Оперативне управління системами сільськогосподарського водопостачання та зрошувальними системами: навч. посібник / Леві Л.І. – Луганськ: Видавництво СНУ, 2001. – 92 с.
46. Лисогоров К.С. Математичне моделювання і створення автоматизованих систем управління в зрошуваному землеробстві / Лисогоров К. С. – Херсон: Айлант, 2003. – 184 с.
47. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта / Лорьер Ж.-Л.; пер. с франц. – М.: Мир, 1991. – 568 с.
48. Малышев Н.Г. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР / Малышев Н.Г., Бернштейн Л.С., Боженюк А.В. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
49. Марьясов В.Г. Орошение земель в лесостепной зоне Поволжья: учеб. пособие / Марьясов В.Г., Марьясов А.В. – Саратов, 1989. – 85 с.
50. Методические указания по агрометеорологическому обеспечению орошаемого земледелия на Украине: [под ред. Н.И.Гойса, Р.Н.Олейника]. – М.: Московское отделение гидрометеоздата, 1989. – 152 с.
51. Методичні рекомендації з оперативного планування режимів зрошення. – К., 2004. – 49 с.
52. Методы и системы принятия решений. Системы, основанные на знаниях: [под ред. А.Н. Борисова]. – Рига: РПИ, 1989. – 175 с.
53. Миронов А.С. О погоде: астропрогноз фермеру / Миронов А.С. – Д.: Пороги, 2005. – 140 с.
54. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной: [под ред. А.Н. Борисова]. – Рига: Зинатне, 1982. – 256 с.
55. Мокін Б.І. Нетрадиційні операції та принципи узагальнення в теорії нечітких множин (основні ідеї та перспективи застосування в прикладних задачах) / Б.І. Мокін, В.В. Камінський, С.Ш. Кацив // Вісник ВПІ. – 2000. – №5.

– С. 83 – 88.

56. Мокін Б.І. Моделювання процесу прогнозування добових графіків споживання електричної потужності на основі баз нечітких знань / Б.І. Мокін, Ю.І. Мітюшкін // Вісник ВПІ. – 2001. – № 5. – С. 58 – 63.
57. Орлов А.И. Задачи оптимизации и нечеткие переменные / Орлов А.И. – М.: Знание, 1980. – 53 с.
58. Орлов В.О. Сільськогосподарське водопостачання та водовідведення: підруч. [для студ. вищ. навч. закл., що навчаються за спец. «Гідромеліорація»] / Орлов В.О., Зошук А.М. – Рівне: УДУВГ та П, 2002. – 204 с.
59. Остапчик В.П. Планирование режимов орошения на основе биоклиматического метода расчета водопотребления сельскохозяйственных культур / Остапчик В.П. – М.: ЦБНГИ Минводхоза УССР (Обзорная информация), 1981. – №9. – 90 с.
60. Остапчик В.П. Информационно-советующая система управления орошением / Остапчик В.П., Костромин В.А., Коваль А.М. – К.: Урожай, 1989. – 248 с.
61. Оцінювання і прогнозування метеорологічних величин в характерні за умовами зволоження періоди вегетації для виконання водобалансових розрахунків та агрометеорологічних прогнозів на довгостроковій основі: методичні вказівки / [Рокочинський А.М., Окопний О.І., Зубик Я.Я. та ін.]. – Рівне, 1996. – 33 с.
62. Панкевич О.Д. Экспертная система диагностики трещин кирпичных конструкций / О.Д. Панкевич // Будівельні конструкції (Строительные конструкции). – 2000. – № 52. – С. 422 – 429.
63. Панкевич О.Д. Определение причин появления трещин кирпичных конструкций на основе нечетких баз знаний / О.Д. Панкевич, И.В. Маевская // Известия вузов: Строительство. – 2002. – №1 – 2. – С. 4 – 8.
64. Пендак Н.В. Інформаційне забезпечення для оптимізації платного водокористування при вирощуванні овочевих культур / Н.В. Пендак // Таврійський науковий вісник. – 2004. – №. 31 (спеціальний). – Херсон: Айлант.

– С. 250 – 255.

65. Пивкин В.Я. Нечеткие множества в системах управления [Электронный ресурс]: курс лекций / Пивкин В.Я., Бакулин Е.П., Кореньков Д.И. – Режим доступа: <http://idisys.tae.nsk.su:8103/fuzzy-book>.

66. Писаренко В.А. Оптимізація режиму зрошення сільськогосподарських культур / В.А. Писаренко // Зрошуване землеробство. – 2002. – № 42. – С. 23 – 29.

67. Писаренко В.А. Режимы орошения сельскохозяйственных культур / Писаренко В.А., Горбатенко Е.М., Йокич Д.Р. – К.: Урожай. – 1988. – 96 с.

68. Писаренко В.А. Водозберігаючі режими зрошення як фактор ефективності використання ресурсів у зрошуваному землеробстві / В.А. Писаренко, Г.Є. Жуйков, І.О. Мельников // Зрошуване землеробство. – 1998. – № 41. – С. 3 – 5.

69. Платонов В.А. Оптимизация условий влагообеспеченности сельскохозяйственных культур / Платонов В.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 118 с.

70. Позняк С.П. Орошаемые черноземы юго- запада Украины / Позняк С.П. – Львов: ВНТЛ, 1997. – 239 с.

71. Полупан М.І. Класифікація ґрунтів України / Полупан М.І., Соловей В.Б., Величко В.А. – К.: Аграрна наука, 2005. – 300 с.

72. Практикум з сільськогосподарської метеорології: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. освіти] / А.М. Польовий, Л.Ю. Божко, В.М. Ситов, О.Є. Ярмольська – О., 2002. – 400 с.

73. Польчина С.М. Меліорація ґрунтів: навч. посібник. Ч. 1 / Польчина С.М. – Чернівці: Рута, 2002. – 75 с.

74. Польчина С.М. Меліорація ґрунтів: навч. посібник. Ч. 2 / Польчина С.М. – Чернівці: Рута, 2002. – 80 с.

75. Попов В.М. Агрономическая тетрадь начинающего фермера / Попов В.М. – М.: НТЦ «Развитие», 2001. – 73 с.

76. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Поспелов Д.А. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 229 с.
77. Проблеми сучасного землекористування: матеріали наук.-практ. конф. молодих вчених, 26 – 28 листоп. 2002 р. / відп. ред. В.Ф. Сайко. – К.; Чабани: Фітосоціоцентр, 2002.
78. Разработка и внедрение автоматизированной информационно-советующей системы оперативного планирования орошения (ИСС ОПО) / Под рук. В.П.Остапчика. – М., 1985. – 413 с.
79. Раскин Л.Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Раскин Л.Г., Серая О.В. – Х.: Парус, 2008. – 352 с.
80. Рекс Л.М. Системные исследования мелиоративных процессов и систем / Рекс Л.М. – М.: «Аслан», 1995. – 122 с.
81. Ромащенко М.І. Обґрунтування екологічно безпечних поливних норм / М.І. Ромащенко, О.І. Жовтоног, Л.А. Філіпенко // Вісник аграрної науки. – 1999. – № 11. – С. 53 – 58.
82. Ромащенко М.І. Інформаційне забезпечення зрошуваного землеробства. Концепція, структура, методологія організації / Ромащенко М.І., Драчинська Е.С., Шевченко А.М. – К.: Аграрна наука, 2005. – 196 с.
83. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 320 с.
84. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике / Ротштейн А.П. – Винница: Континент-ПРИМ, 1996. – 132 с.
85. Ротштейн А.П. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний / А.П. Ротштейн, Д.И. Кательников // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 5. – С. 53 – 61.
86. Ротштейн О.П. Soft Computing в біотехнології: багатofакторний аналіз і діагностика / О.П. Ротштейн., Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Мітюшкін. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 144 с.

87. Ротштейн А.П. Прогнозирование количества заболеваний на основе экспертно-лингвистической информации / А.П. Ротштейн, Е.Е. Лойко, Д.И. Котельников // Кибернетика и системный анализ. – 1999. – № 2. – С. 178 – 185.
88. Ротштейн А.П. Извлечение нечетких баз знаний из экспериментальных данных с помощью генетических алгоритмов / А.П. Ротштейн, Ю.И. Митюшкин // Кибернетика и системный анализ. – 2001. – № 4. – С. 45 – 53.
89. Ротштейн О.П., Кательников Д.І. Ідентифікація нелінійних об'єктів нечіткими базами знань / О.П. Ротштейн, Д.І. Кательников // Вісник ВПІ. – 1997. – № 4. – С. 98 – 103.
90. Руководство по использованию орошаемых черноземов. – К.: ИГиМ, 1991. – 154 с.
91. Синельников Э.П. Оптимизация свойств и режимов периодически переувлажняемых почв / Синельников Э.П. – Уссурийск, 2000.
92. Справочник по орошаемому земледелию / [ред. Остапов В.И.] – К.: Урожай, 1989. – 256 с.
93. Сучасний стан, основні проблеми водних меліорацій та шляхи їх вирішення / [ред. П.І. Коваленко, ред.-упоряд. М.І. Ромащенко]. – К.: Аграрна наука, 2001. – 214 с.
94. Тацілін М.В. Автоматизація діагностування об'єкта зрошення / М.В. Тацілін // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2008. – №88. – С. 111 – 115.
95. Тацилин М.В. Нечеткая экспертная система с регрессионным механизмом логического вывода / М.В. Тацилин, Т.И. Каткова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2009. – №4. – С. 69 – 75.
96. Тимчасові методичні рекомендації з режимів зрошення та управління поливами на зрошуваних землях України в 1995р. – К.: УААН, ІЗЗ, ІГіМ, 1995. – 23 с.

97. Томашівський З.М. Меліоративне землеробство: навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів та спеціалістів сільського госп-ва / Томашівський З.М. – Львів, 1996. – 320 с.
98. Турулев В.В. Регулирование водного режима орошаемых черноземов юга степной зоны России / Турулев В.В. – Ростов н/Д: Издательство СКНЦ ВШ, 2001. – 164 с.
99. Ушкаренко В.О. Зрошуване землеробство: підручник [для студ. та викладачів вищих навч. закладів агроном.спец.] / Ушкаренко В.О. – К.: Урожай, 1994. – 326 с.
100. Филиппов Л.А. Водный режим растений и диагностика поливов / Филиппов Л.А. – Новосибирск: Наука Сиб. отд., 1982. – 140 с.
101. Хвесик М.А. Комплексний аналіз розвитку водних меліорацій в Україні / Хвесик М.А., Радкевич Н.М. – К.: РВПС України НАН України, 2003. – 127 с.
102. Чабан В.Й. Проблеми господарського водокористування на гідромеліоративних системах України / Чабан В.Й. — Рівне: Видавничий центр УДУВГП, 2003.
103. Чарний В.Г. Вимоги до строків проведення поливів / Чарний В.Г. // Меліорація і водне господарство. – 1996. – №82. – С. 31 – 35.
104. Овочівництво: навч. посіб. для студ. аграрних вузів III – IV рівнів акредитації / [Шемавн'юв В.І., Лазарева О.М., Грекова Н.В. та ін.]. – Д.: ДДАУ, 2001. – 390 с.
105. Штейнберг Ш.Е. Идентификация в системах управления / Штейнберг Ш.Е. – М.: Энерго-атомиздат, 1987. – 81 с.
106. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / Штовба С.Д. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
107. Штойко Д.А. Біофізичний метод визначення строків поливу сільськогосподарських культур / Штойко Д.А. – Херсон: УкрНДІЗЗ, 1974. – 21 с.

108. Шуравилин А.В. Мелиорация: учеб. пособие [для студ. вузов, обуч. по направлениям и спец. агр. образования] / Шуравилин А.В., Кибека А.И. – М.: «ИКФ «ЭКМОС», 2006. – 943 с.
109. Щукин В.Б. Устойчивость растений к водному стрессу / Щукин В.Б. – Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2001. – 23 с.
110. Babuska R. Fuzzy Modeling for Control / Babuska R. Boston: Kluwer Academic Publishers. – 1998.
111. Gen M. Genetic Algorithms and Engineering Design / Gen M., Cheng R. – John Wiley & Sons, New York, 1997. – 352 p.
112. Malano H. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector / Malano H., Burton M. – Rome: FAO, 2001. – 45 p.
113. Mamdani E.H. Higher-order logics for handling uncertainty in expert systems / Mamdani E.H., Efstathion H.J. – «Int. J. Man-Mach. Stud.», 1985, N3. – P. 243 – 259.
114. Phocaides A. Handbook on pressurized irrigation techniques / Phocaides A. — Rome: FAO, 2001. – 195 p.
115. Rotshtein A. Design and tuning of fuzzy if-then rules for medical diagnosis. In N.-H. Teodorescu (ed): Fuzzy and Neural-Fuzzy Systems in Medical and Biomedical Engineering / Rotshtein A. – CRC Press, 1998. – P. 35 – 97.
116. Rotshtein A.P., Katelnikov D.I. Tuning of Fuzzy Rules for Nonlinear Objects Identification with Discrete and Continuous Output // Proc. 6th European Congr. on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT '98). – Aachen (Germany). – 1998. – P. 929 – 934.
117. Rotshtein A.P., Katelnikov D.I., Design and Tuning of Fuzzy If-Then Rules for Automatic Classification // Proc. International Conf. «Annual Meeting of North American Fuzzy Information Processing Society – NAFIPS '98». – Tampa (USA). – 1998. – P. 50 – 55.
118. Tang K.S. Genetic Algorithms and their Applications / Tang K.S, Man K.F., Kwong S., He Q. // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – Nov. — P. 22 – 36.

119. Tanji Kenneth K. Agriculture drainage water management in arid and semi-arid areas / Tanji Kenneth K., Kielen Neeltje C. – Rome: FAO, 2002. – 189 p.
120. Unlocking the water potential of agriculture. – Rome: FAO, 2003. – 62 p.
121. Zimmermann H.J. Fuzzy set theory and its application / Zimmermann H.J. – Kluwer: Dordrecht. – 1991. – 315 p.

Додаток Б

Параметри функцій належності контрольованих змінних

Таблиця Б.1

Параметри функцій належності $\mu_j(x_1)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_1	b	1	0,88	0,75	0,62	0,51	0,38	0,25	0,12	0
	c	0,1	0,13	0,1	0,14	0,1	0,1	0,12	0,1	0,1

Таблиця Б.2

Параметри функцій належності $\mu_j(x_2)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_2	b	1	0,81	0,72	0,64	0,58	0,38	0,21	0,11	0
	c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблиця Б.3

Параметри функцій належності $\mu_j(x_3)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_3	b	30	26,5	22,3	18,15	14,12	11,1	6,2	3,75	0
	c	0,12	0,1	0,11	0,1	0,12	0,1	0,11	0,1	0,1

Таблиця Б.4

Параметри функцій належності $\mu_j(x_4)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_4	b	50	33,8	28,3	20,12	17,89	12,42	10,21	4,23	0
	c	40	6	7,2	7,4	7,1	7	7,2	6,9	7

Таблиця Б.5

Параметри функцій належності $\mu_j(x_5)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_5	b	1	0,86	0,81	0,71	0,49	0,36	0,22	0,98	0
	c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблиця Б.6

Параметри функцій належності $\mu_j(x_6)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_6	b	1	0,86	0,81	0,71	0,49	0,36	0,22	0,98	0
	c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблиця Б.7

Параметри функцій належності $\mu_j(x_7)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_7	b	0	4,3	5,1	6,5	7,1	7,6	8,1	9,8	20
	c	4	4,1	4	4	5,1	4,7	4,5	4	4

Таблиця Б.8

Параметри функцій належності $\mu_j(x_8)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_8	b	100	90	82	70	67	64	62	55	50
	c	17	5	5,2	5,1	5	5	5	5	5

Таблиця Б.9

Параметри функцій належності $\mu_j(x_9)$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_9	b	50	33	28	20	17	12	10	4	0
	c	40	6	7,2	7,4	7,1	7	7,2	6,9	7

Таблиця Б.10

Параметри функцій належності $\mu_j(x_{10})$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_{10}	b	20	23	32	20	23	26	30	34	40
	c	5	6	5	5,4	5,1	6	5,2	5,9	5

Таблиця Б.11

Параметри функцій належності $\mu_j(x_{11})$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_{11}	b	100	92	45	80	70	66	60	50	42
	c	10	8	8	9	8	7	7,2	7,9	8

Таблиця Б.12

Параметри функцій належності $\mu_j(x_{12})$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_{12}	b	0	1,5	5	6	7	8	9	9,50	15
	c	1,3	1,5	1	1	1	1	1	1,7	2,5

Таблиця Б.13

Параметри функцій належності $\mu_j(x_{13})$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_{13}	b	1	0,88	0,75	0,62	0,51	0,38	0,25	0,12	0
	c	0,1	0,13	0,1	0,14	0,1	0,1	0,12	0,1	0,1

Таблиця Б.14

Параметри функцій належності $\mu_j(x_{14})$

$d_j \backslash x_i$		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
x_{14}	b	1	0,8	0,55	0,22	0,75	0,58	0,55	0,52	0,5
	c	0,1	0,13	0,1	0,14	0,1	0,1	0,12	0,1	0,1

ЛЄВІ ЛЕОНІД ІСААКОВИЧ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В ІДЕНТИФІКАЦІЇ І КЕРУВАННІ СКЛАДНИМИ ТЕХНІЧНИМИ
ОБ'ЄКТАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Комп'ютерна верстка Л.І. Леві

Коректор І.Л. Петренко

Виготовлювач: ФОП Смірнов А.Л.

Адреса: 36000, м. Полтава, вул. Половки, 93, кв. 150

тел.: (+38) 097 319-10-24

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 5117 від 07.06.2016 р.

Підписано до друку – 31.05.2021. Формат 60x84/16.

Гарнітура «Times New Roman». Ум. друк. арк. 11.28

Папір офсетний. Друк RISO.

Наклад 300 прим. Зам. № 01 від «15» 06 2021 р.