

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Д. ПАНКЕВИЧ, С. Д. ШТОВБА

**ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДОПОМО-
ГОЮ НЕЧІТКИХ БАЗ ЗНАНЬ**

Монографія

«УНІВЕРСУМ-Вінниця»

2005

УДК 658.012.1:624.01

П16

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор **О. М. Лівінський**

доктор технічних наук, професор **М. Ф. Друкований**

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 24.02.05).

О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба

П16 Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108с.

ISBN 966-641-135-0

В монографії викладений метод визначення причин появи тріщин в конструкціях будівель, який ґрунтується на нечітких правилах <Якщо – тоді>. Одним з прикладів практичного застосування запропонованої теорії діагностування пошкоджень є автоматизована система встановлення причин появи тріщин в цегляних конструкціях будівель, яка детально описана в монографії. Монографія буде корисна інженерам-будівельникам, науковим співробітникам та аспірантам в розробці автоматизованих систем діагностування пошкоджень

УДК 658.012.1:624.01

ISBN 966-641-135-0

© О. Панкевич, С. Штовба, 2005

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	7
1.1. Тріщини будівельних конструкцій як об'єкт діагностування.....	7
1.2. Постановка задачі діагностування тріщин будівельних конструкцій.....	11
1.3. Аналіз методів діагностування тріщин будівельних конс- трукцій.....	12
1.3.1. Байесівський підхід.....	14
1.3.2. Метод найближчого сусіда.....	14
1.3.3. Логічний висновок.....	15
1.3.4. Дерева рішень.....	16
1.3.5. Штучні нейронні мережі.....	17
1.3.6. Нечітка логіка.....	18
1.3.7. Еволюційне програмування.....	19
1.3.8. Порівняння методів діагностування тріщин.....	19
РОЗДІЛ 2. ТЕОРІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН НА ОС- НОВІ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ.....	21
2.1. Основні положення теорії нечітких множин.....	21
2.2. Принципи діагностування тріщин цегляних конструкцій на базі нечіткої логіки.....	23
2.3. Моделі функцій належності нечітких термів.....	27
2.4. Нечіткі бази знань.....	28
2.5. Нечіткий логічний висновок.....	30
2.6. Навчання нечіткої моделі.....	33
2.6.1. Постановка задачі навчання.....	33
2.6.2. Генетичний алгоритм навчання нечіткої моделі.....	35
2.6.3. Перевірка адекватності діагностичної моделі.....	39
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ТРІЩИН ЦЕГЛЯНИХ КОНС- ТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ.....	40
3.1. Типи діагностичних рішень.....	40
3.1.1. Статичне перевантаження.....	41
3.1.2. Динамічне перевантаження.....	41
3.1.3. Особливе перевантаження.....	42
3.1.4. Дефекти фундаментів та деформації основи.....	42
3.1.5. Температурні деформації.....	43

3.1.6. Порушення технології будівельних процесів або неврахування властивостей матеріалів.....	43
3.2. Ієрархічна класифікація параметрів стану.....	44
3.3. Формалізація параметрів стану лінгвістичними змінни- ми.....	55
3.4. Нечіткі бази знань з діагностування тріщин.....	59
3.5. Нечітка модель діагностування тріщин цегляних конс- трукцій.....	64
3.6. Навчання нечіткої моделі діагностування тріщин цегля- них конструкцій.....	80
3.7. Автоматизація діагностування тріщин цегляних констру- кцій.....	85
ПІСЛЯМОВА.....	95
ЛІТЕРАТУРА.....	96
Додаток А. Параметри нечіткої моделі діагностування тріщин цегляних конструкцій.....	102
Додаток Б. Бланк обліку та діагностування тріщини.....	107

ВСТУП

Серед будівель, які експлуатують в Україні, достатньо велика частка має пошкоджені конструкції. При паспортизації, оцінці технічного стану, відновленню та реконструкції таких будівель виникає задача діагностування пошкоджень, тобто визначення причин їх появи. Правильне встановлення причини появи пошкоджень на ранніх етапах обстеження будівлі значно скорочує термін і вартість проектних та відновлювальних робіт. Наприклад, якщо на етапі візуальних обстежень вдається встановити, що причиною виникнення тріщини є температурна деформація конструкції, тоді відпадає необхідність перевіряти якість фундаментів – відривати шурфи, експериментально визначати характеристики ґрунтів і фундаментів, проводити відповідні розрахунки тощо.

Одним із найбільш розповсюджених типів пошкоджень будівель є тріщини. Питання діагностування тріщин будівельних конструкцій досліджувалися в роботах А. Я. Барашикова, М. Д. Бойко, Р. І. Вейца, І. А. Фізделя, Р. Рибицького, колективних працях Центрального науково-дослідного інституту промислових будівель, Московського науково-дослідного інституту будівельних конструкцій та інших. Незважаючи на великий обсяг робіт з обстеження пошкоджених будівельних конструкцій на сьогодні відсутні автоматизовані системи діагностування тріщин. На нашу думку це пояснюється високою складністю задачі діагностування, при вирішенні якої необхідно враховувати вплив великої кількості різноманітних факторів, таких як: тип конструкції, стан конструкції, геометричні параметри тріщини, напрямок її розкриття, місце розташування тощо.

Досвідчені експерти-будівельники достатньо легко, без складання та розв'язування будь-яких рівнянь, визначають клас причин виникнення тріщини, наприклад, перевантаження статичне, нерівномірне осідання будинку, температурні деформації. При прийнятті рішень вони використовують лінгвістичні правила типу «Якщо тріщина *вертикальна*, та проходить *через усю стіну*, та розкрита *донизу*, та ґрунти *неоднорідні*, тоді причина – *нерівномірне осідання фундаменту*», у яких сконцентровані теоретичні знання і особистий досвід діагностування. Одним із потужних методів обробки таких експертних знань є теорія нечітких множин.

В монографії викладається метод визначення причин появи тріщин в конструкціях будівель, який ґрунтується на нечітких правилах <Якщо – тоді>. В ній розвиваються ідеї професора О. П. Ротштейна з медичної діагностики на нечіткій логіці [62] та з теорії генетико-нечіткої ідентифікації [64] з урахуванням специфіки об'єкта діагностування – тріщин будівельних конструкцій.

Книга складається з трьох розділів.

В першому розділі розглядається процес діагностування тріщин конструкцій будівель, наводиться математична постановка задачі діагностування тріщин, описуються основні труднощі діагностування тріщин та аналізуються методи діагностування.

В другому розділі наводяться основні положення теорії нечітких множин, формулюються принципи діагностування тріщин будівельних конструкцій на базі нечіткої логіки та описуються етапи проектування нечітких діагностичних моделей.

В третьому розділі наводиться інформація про автоматизовану систему діагностування тріщин цегляних конструкцій будівель, яка розроблена в кандидатській дисертації О. Д. Панкевич [45]. Проектування системи описується детально, що дає змогу створювати аналогічні комп'ютерні системи з діагностування пошкоджень різноманітних будівельних, механічних, електротехнічних та інших об'єктів.

Книга може використовуватися студентами технічних університетів під час вивчення дисциплін “Реконструкція та підсилення будівель та споруд”, “Будівельні конструкції”, “Комп'ютерні технології в будівництві”, “Інтелектуальні технології” та “Теорія прийняття рішень”. Книга буде корисна інженерам-будівельникам, науковим співробітникам та аспірантам в розробці автоматизованих систем діагностування пошкоджень.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розглядається процес встановлення причин появи тріщин в конструкціях будівель, наводиться математична постановка задачі діагностування тріщин, описуються основні труднощі діагностування тріщин та аналізуються методи діагностування. Розділ написано за роботами [42, 44, 46].

1.1. Тріщини будівельних конструкцій як об'єкт діагностування

Згідно до [13] однією з найголовніших задач технічного діагностування є виявлення причини виникнення несправності або дефекту. Тому під діагностуванням тріщини будівельних конструкції будемо розуміти задачу виявлення причини виникнення такого дефекту як тріщина. За визначенням, яке дає енциклопедичний словник [73], тріщина – це порушення суцільності твердого тіла, яке локалізоване уздовж деякої поверхні; плоский дефект, молекулярні зв'язки між берегами якого розірвані. Тріщина відноситься до одного з основних і найбільш поширених пошкоджень цегляних, бетонних і металевих конструкцій. Тріщини будівельних конструкцій за походженням поділяються на осадові (рис. 1.1), силові (рис. 1.2) та температурно-вологісні (рис. 1.3) [74].

Аналіз досвіду обстежень будівель свідчить, що причинами появи тріщин будівельних конструкцій є зовнішні силові взаємодії та внутрішні сили, які обумовлені змінами фізико-механічних властивостей матеріалів при експлуатації будівлі [68]. Наприклад, в цегляних конструкціях найбільш розповсюдженими зовнішніми причинами появи тріщин в кладці стіни є невідповідність несучої спроможності існуючої кладки на стиск до її фактичного навантаження та нерівномірне осідання будівлі [37, 75].

Характер тріщиноутворення залежить від матеріалу будівельної конструкції (цегла, бетон, метал тощо) та її призначення (стіна, балка, ферма, колона тощо). Наприклад, для цегляної кладки процес тріщиноутворення має вигляд, який зображено на рис. 1.4. В початковій стадії тріщиноутворення в цегляній кладці, що працює на стиск, з'являються окремі короткі тріщини довжиною до двох-трьох рядів кладки. Вони проходять по

співпадаючих вертикальних швах з ушкодженням розчину в одному-двох горизонтальних швах. Такі тріщини в перев'язочних цеглинах вказують на значну напругу в кладці. При слабкому розчині ($R < 1,0$ МПа) початкова стадія тріщиноутворення спостерігається при навантаженнях, які складають біля 50% від руйнівних, а при кладці на міцному розчині ($R > 5,0$ МПа) – при навантаженнях біля 80%. Короткі тріщини, які перетинають окремі цеглини, виникають у результаті роботи цегли на згин через погано підготовлену постіль із розчину, або через те, що окремі цеглини до укладки мали викривлення. Іноді в кладці використовують цеглу, яка вже має тріщини. Такі тріщини, як правило, несуттєво знижують несучу спроможність кладки [74].

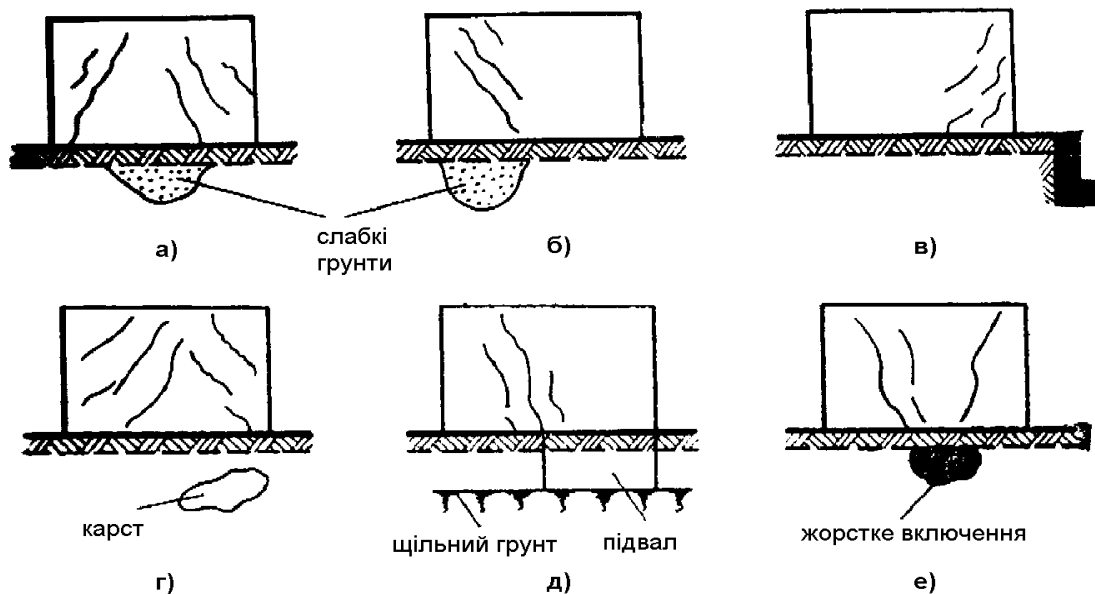


Рис. 1.1. Осадові тріщини [74]

а) та б) розташування слабких ґрунтів під частиною будівлі;
 в) зсув підпірної стіни; г) пустоти (карст); д) підвал під частиною будівлі;
 е) жорстке включення значних розмірів.

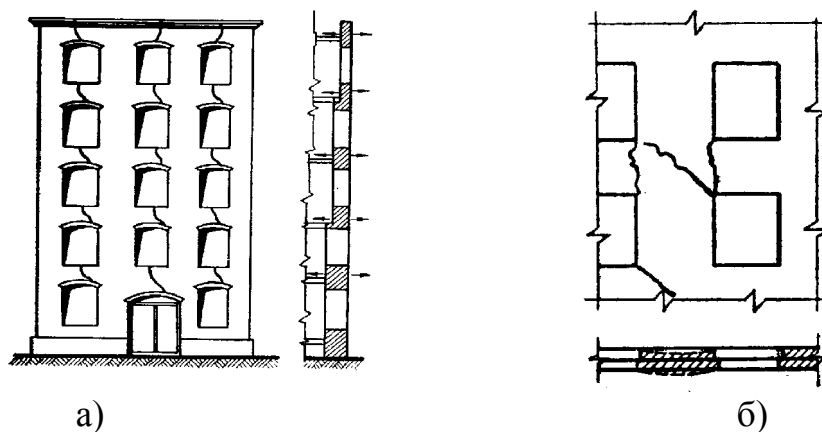


Рис. 1.2. Силлові тріщини [74]

а) від інтенсивного руху транспорту; б) від перевантаження простінку.

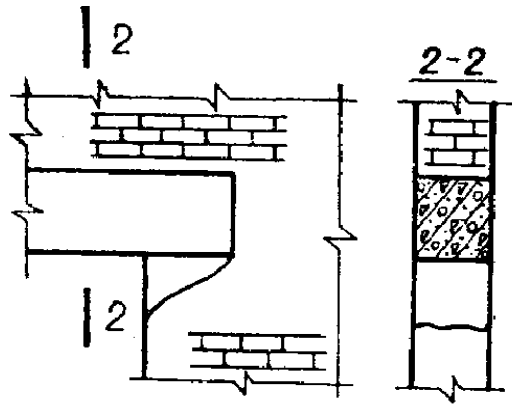


Рис. 1.3. Тріщина від усадки монолітної перемички [74]

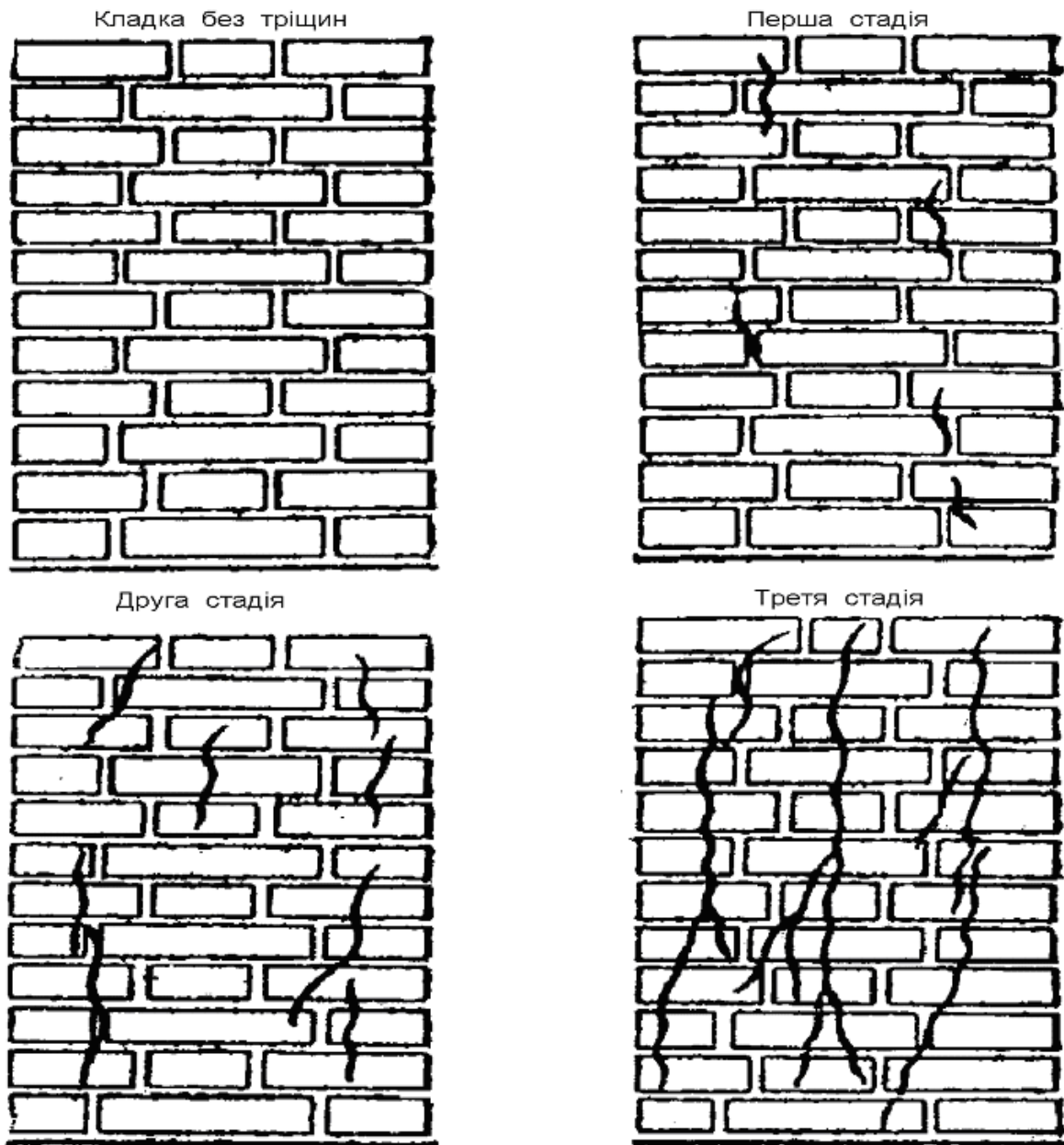


Рис. 1.4. Стадії тріщиноутворення в цегляній кладці [3]

Друга стадія тріщиноутворення свідчить про суттєву перенапругу кладки на рівні 70–90% від руйнівних значень. Ця стадія характеризується появою вертикальних тріщин в декількох рядах кладки, що проходять як по розчинних швах, так і по цеглі.

Третя стадія тріщиноутворення свідчить про аварійний стан кладки, її руйнування через втрату стійкості кладки, яку пронизують тріщини.

Характер тріщиноутворення в бетонних, металевих і залізобетонних конструкціях викладено в роботах [7, 58, 59].

При експлуатації будівель та споруд для оцінки технічного стану конструкції широке застосування набули візуальні обстеження [14, 56, 57]. Підкреслимо, що в багатьох випадках технічна документація на будівлю, що знаходиться в експлуатації кілька років, або взагалі відсутня, або некомплектна. Журнали робіт, якщо вони ще зберігаються, не містять необхідних даних. Паспорта на вироби та матеріали майже ніколи не зберігаються. Нестачу документації частково можна компенсувати опитуванням інженерно-технічних робітників. Однак, частіше за все доводиться збільшувати обсяг робіт з натурального обстеження конструкції і надавати висновки, ґрунтуючись лише на результатах обстеження [74].

Досвід встановлення причин появи тріщин будівельних конструкцій показує, що необхідно враховувати такі параметри, як тип конструкції в якій є тріщина, вид тріщини, характер тріщини (ширина, довжина, глибина, напрям розкриття) та додаткову інформацію про непередбачені навантаження, відсутність вимощення тощо [7, 14, 57, 58, 72]. Для ілюстрації розглянемо два приклади діагностування тріщин в цегляних конструкціях.

Приклад 1 (за даними [72])

В глухій цегляній стіні з'явилися вертикальні та косі тріщини довжиною 10 м та шириною розкриття до 40 мм. Тріщини виникли після багатьох років експлуатації. При обстеженні було встановлено, що вздовж стіни відсутнє вимощення і дощова вода із водостічної труби, що розташована біля самої стіни, просочується в ґрунт.

Висновок візуального обстеження: причина появи тріщин – нерівномірне осідання стін. Встановлена причина надалі була підтверджена відривом шурфів.

Наведена в прикладі 1 інформація може бути формалізована так:

Якщо	конструкція	–	стіна глуха,
та	вид тріщини	–	коса,
та	довжина	–	10 м,
та	ширина	–	40 мм,
та	вимощення	–	відсутнє,
тоді	причина – нерівномірне осідання стін.		

Приклад 2 (за даними ЗАТ "Вінницький проектний інститут")

Об'єкт обстеження – насосна станція Могилів-Подільського машинобудівного заводу. Будівля розташована на слабких ґрунтах. При обстеженні виявлена коса тріщина в цегляній стіні з прорізом. Тріщина розта-

шована в нижній частині, має ширину 2 мм знизу та затухає догори. Довжина тріщини – 1.2 м. При обстеженні будівлі була звернута увага на неякісно виконаний осадочний шов та наявність поблизу ємнісних споруд.

Висновок візуального обстеження: причина появи тріщин – нерівномірне осідання стін. При детальному обстеженні встановлена причина появи тріщини була підтверджена.

Наведену в прикладі 2 діагностичну інформацію формалізуємо так:

Якщо	конструкція	–	стіна з прорізом,
та	вид тріщини	–	коса,
та	довжина	–	1.2 м,
та	ширина	–	2 мм,
та	місце положення	–	нижня частина,
та	розкриття	–	нижнє,
та	осадочний шов	–	неякісний,
та	грунти	–	слабкі,
та	ємнісні споруди	–	розташовані близько,
тоді	причина – нерівномірне осідання стін.		

1.2. Постановка задачі діагностування тріщин будівельних конструкцій

Із наведених вище прикладів видно, що задачі діагностування тріщин з математичної точки зору відповідає відображення типу:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow d \in D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\},$$

де X – множина параметрів стану конструкції, що діагностується;
 D – множина причин появи тріщини.

Незважаючи на велику кількість публікацій з теорії діагностування до цього часу практично відсутні інструментальні програмні засоби, які дозволяють створювати та впроваджувати системи підтримки прийняття рішень при обстеженні будівельних конструкцій з тріщинами. На наш погляд це зумовлено такими труднощами, що виникають при діагностуванні тріщин будівельної конструкції:

- для правильного встановлення причини появи тріщини потрібно враховувати багато параметрів стану, кількість яких може досягати декількох десятків;
- відсутність аналітичної залежності між параметрами стану конструкції і причиною появи тріщини в конструкції. Складність побудови таких залежностей визначається як великим числом парамет-

- рів стану, так і їх різномірним характером: вони можуть бути кількісними (довжина тріщини, ширина швів кладки і т.п.), якісними (тип конструкції – стіна глуха, стіна з прорізом, несуча, самонесуча), бінарними (наявність вимощення – є / немає) тощо;
- відсутні банки даних тріщин будівельних конструкцій з інформацією про верифіковані причини появи тріщин та параметри стану будівельної конструкції, за якими можна ідентифікувати процес діагностування. На сьогодні такі банки даних відсутні як в Україні [12, 33], так і закордоном [86].

1.3. Аналіз методів діагностування тріщин будівельних конструкцій

Актуальність питання діагностування пошкоджень будівельних конструкцій обумовило велику кількість досліджень в цій області [1, 3, 6, 7, 16, 19, 20, 26, 30, 35, 48, 57-60, 68-70, 74, 78, 83]. Серед найбільш опрацьованих в інженерному плані робіт виділимо публікації [3, 16, 20, 35, 48, 57, 58, 60, 68, 74, 83].

В роботі [58] визначається можлива причина появи тріщини в залежності від характеру тріщини (параболічна, вертикальна, горизонтальна), її місця розташування (середня частина будівлі, місце перепаду висот, лінія прибудови нової будівлі до існуючої) та напрямлення розкриття (ширина тріщини збільшується догори, однаково розкрита по висоті, ширина тріщини збільшується донизу). Проте багато факторів, що впливають на встановлення причини появи тріщини (стан конструкції, ширина тріщини, наявність деформаційного шву, динамічного навантаження тощо) не враховуються. Окрім цього до недоліків роботи можна віднести невичерпний опис місця розташування тріщини та її характеру.

В статті [83] наведено три приклади діагностування тріщин в бетонних конструкціях на основі бази логічних правил <Якщо –тоді>. Причини появи тріщин розділені на чотири класи, які пов'язані з: 1) якістю матеріалів; 2) технологічним процесом бетонування; 3) впливом зовнішнього середовища; 4) навантаженням конструкції. Логічний висновок причини появи тріщини здійснюється по базі логічних правил, представлених можливою сіткою Петрі. При цьому враховуються такі параметри стану: 1) час появи тріщини; 2) глибина тріщини; 3) регулярність тріщини; 4) масштабність тріщини; 5) тип пошкодженої конструкції; 6) характер тріщини та 7) розташування тріщини. Сітки Петрі дозволяють синтезувати зрозумілі для інженерів-будівельників моделі діагностування з можливістю деталізації причин появи тріщини. Недоліком підходу є суб'єктивне встановлен-

ня коефіцієнтів довіри в правилах можливого висновку та до початкових даних.

Крім багатофакторного аналізу причин появи тріщини в літературі описані і часткові одно- та двох- факторні залежності. Наприклад, в [16] наводяться дані про вплив перепадів температури повітря на появу тріщин в зовнішніх цегляних стінах. Двофакторні залежності розглядаються в роботах [37, 68, 69, 74]. Причина появи тріщини в цегляних конструкціях встановлюється в основному по зовнішнього вигляду тріщини та, іноді, направленню її розкриття. Але ці знання не систематизовані і не верифіковані. В роботі [60] наводяться дані про вплив ґрунтів та швидкості коливань при вибухах на появу тріщин різних геометричних розмірів.

Роботи [3, 57] інформують про системи оцінювання фізичного зносу пошкоджених будівель (нормальний стан, задовільний, незадовільний, аварійний). В деяких публікаціях розроблюються моделі оцінки показників стану будівлі при різних типах пошкоджень з урахуванням матеріалу конструкцій. Наприклад, в роботі [35] наведені рекомендації по встановленню ступеня пошкодження цегляних конструкцій (слабка, середня, сильна, повне руйнування) в залежності від інтенсивності впливу вибухової хвилі і високих температур. В роботі [27] розглядається питання діагностики цегляних конструкцій, що підлягали впливу вогню. В залежності від виду цегли (силікатна, червона), значення температури (300°C , 600°C , 700°C , 900°C) визначається стан конструкції (зростання міцності, зниження міцності, поява тріщин тощо). В роботі [5] досліджується вплив дефектів на міцність цегляної кладки. Тобто, інформація з цих робіт може використовуватися для оцінювання стану пошкодженої конструкції, що є лише одним з факторів, які впливають на визначення причини виникнення тріщини.

Таким чином, у відомих роботах з діагностування тріщин будівельних конструкцій наведені лише часткові правила-приклади діагностування. Формальні методики, які дозволяли б знайти причину появи довільної тріщини будівельної конструкції невідомі.

Діагностування тріщини будівельної конструкції можна розглядати як часткову задачу технічного діагностування. Відповідно до ГОСТ 20911-89 [13] однією з основних задач технічного діагностування є визначення причин появи відмови (дефекту) об'єкта. В нашому випадку об'єктом діагностування виступає будівельна конструкція, а дефектом – тріщина. Тому для діагностування тріщин будівельних конструкцій крім підходів, зазначених в спеціальних публікаціях [5, 16, 19, 27, 35, 48, 51, 58, 60, 69], можна використовувати і інші методи, що розроблені в рамках технічної діагностики. Найпоширенішими серед них є байесівський підхід, логічне програмування, дерева рішень та метод найближчого сусіда. Серед новітніх інтелектуальних технологій діагностування виділимо нечітку логіку, нейронні мережі та еволюційне програмування.

1.3.1. Байєсівський підхід

При описуванні байєсівського підходу використовуються роботи [22, 29, 32].

Введемо такі позначення:

$P(d_j)$ – апіорна ймовірність діагнозу $d_j, j=\overline{1,m}$;

$P(X^*/d_j)$ – умовна ймовірність появи у об'єкта з параметрами стану $X^*=(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ діагнозу d_j ;

$P(d_j/X^*)$ – апостеріорна ймовірність діагнозу d_j у об'єкта у X^* .

Тоді за формулою Байєса

$$P(d_j/X^*) = \frac{P(d_j) \cdot P(X^*/d_j)}{\sum_{i=1}^m P(d_i) \cdot P(X^*/d_i)}.$$

За цією формулою апіорні ймовірності різних причин виникнення тріщин перераховуються у апостеріорні ймовірності цих подій при отриманні інформації про об'єкт, стан якого визначається вектором параметрів X^* . Після обчислення апостеріорних ймовірностей усіх можливих діагнозів d_j ($j=\overline{1,m}$), як рішення обирається діагноз з найбільшою ймовірністю.

Різним модифікаціям байєсівського підходу, які використовуються в діагностиці, властиві такі обмеження [62]:

1. Статистична інформація, що необхідна для застосування теореми Байєса, як правило, відсутня. Її збір, обробка і зберігання пов'язані зі значними організаційними і обчислювальними труднощами.

2. Значну складність представляє внесення в модель нової інформації, що обумовлено необхідністю перерахунку усіх ймовірностей.

3. Використання теореми Байєса ґрунтується на припущенні, що кожен діагноз має свої набори параметрів стану, що не перетинаються. На практиці це не завжди виконується, оскільки однакові параметри стану можуть зустрічатися при різних діагнозах.

1.3.2. Метод найближчого сусіда

Ідею методу найближчого сусіда [22] є віднесення об'єкта, що характеризується вектором параметрів стану, до того чи іншого класу (діагнозу) на основі обчислення відстаней між двома точками у факторному просторі. Розглядається n -вимірний простір, кожна координата x_i $i=\overline{1,n}$

якого відповідає одному параметру стану. Кожній точці (x_1, x_2, \dots, x_n) факторного простору ставиться у відповідність деякий діагноз d_j , $j = \overline{1, m}$.

На основі вивчення тріщин з правильно визначеними причинами їх появу в факторному просторі можна виділити кластера (множини точок), що відповідають діагнозам d_1, d_2, \dots, d_m . Центри цих кластерів позначимо C_1, C_2, \dots, C_m . Нехай X^* – об'єкт, що діагностується; $R(X^*, C_j)$ – відстань між точками X^* та C_j , $j = \overline{1, m}$. Тоді об'єкт з параметрами $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ відносять до класу C^* (діагнозу d^*) для якого

$$C^* = \arg \min_{C_1, C_2, \dots, C_m} (R(X^*, C_j))_{j=1, m}.$$

Пролог зручний для пошуку ланок правил в базі знань, що ведуть від фактів x_i^* до мети d^* або навпаки, від мети до фактів. Це дозволяє не тільки ставити діагноз, але й пояснювати причини прийнятого рішення. Однак існує велика кількість знань, що мають нечітку, лінгвістичну природу. Наприклад, в будівництві це знання типу “Якщо довга коса тріщина знаходиться у нижній частині несучої конструкції, та розкрита донизу, та є аварії системи водопостачання, та будівля розташована на слабких ґрунтах, тоді причина появи тріщини – деформації основи”. Для подібних знань у системах логічного висновку вводять коефіцієнти упевненості зі значеннями від -1 до 1 (від ненадійних до достовірних знань). Цей спосіб досить простий, але певною мірою – суб’єктивний. До того ж коефіцієнт упевненості стосується усього правила. Але елементи одного правила, наприклад, “довга коса тріщина”, “нижня частина конструкції”, “слабкі ґрунти” тощо, можуть мати різні ступені невизначеності.

Логічний висновок у Пролозі реалізовано через операцію пошуку за зразком. Іншими словами, для висновку за допомогою правила «Якщо $x \in A$, тоді $y \in B$ » спочатку треба перевірити, чи існує в базі знань факт « $x \in A$ ». Пролог не забезпечує можливості логічного висновку у проміжних точках типу « $x \in$ величина близька до A ». Тому в базі знань необхідно зберігати інформацію про весь факторний простір. Це катастрофічно збільшує час проектування баз знань для реальних задач діагностування тріщин. Наведемо такий приклад. Нехай стан об’єкта задається вісьмома параметрами, кожен з яких може приймати одне з п’яти можливих значень. Тоді повна база знань для цього об’єкта складається з $5^8 = 390\,625$ правил, що забагато. Крім того Пролог погано пристосований для роботи з кількісними параметрами стану.

1.3.4. Дерева рішень

Дерево рішень [23] – це графове представлення гілчастого алгоритму прийняття рішень. Листки дерева (кінцеві вершини графа) відповідають класам рішень, в нашому випадку – можливим причинам появи тріщини. Решта вершин являють собою логічні умови типу “значення параметра x більше за A ?” Якщо умова виконується, тоді здійснюється перехід до правої вершини наступного рівня, інакше – до лівої вершини. Потім в наступній вершині знову перевіряється умова.

Дерева рішень реалізують принцип послідовного перегляду ознак, тому в n -вимірному просторі усі кластера мають форму гіперпаралелепіпедів. З кібернетичної точки зору такий підхід є трохи наївним, але незважаючи на це, дерева рішень – один з найпопулярніших методів класифікації. Існують програмні пакети, наприклад See5, які здатні автоматично синтезувати дерево рішень з експериментальних даних з врахуванням великого

числа кількісних, якісних та бінарних параметрів стану. Популярність дерев рішень пов'язана з їх простотою і прозорістю, а також з наочністю та зрозумілістю процесу класифікації для користувачів: інженерів, банкірів, лікарів, ремонтників тощо. На нашу думку, створенню складних діагностичних моделей повинні передувати експерименти з простими деревами рішень. Екстракція дерева рішень є швидкою процедурою навіть при великих вибірках даних. Хоча для реальних задач дерево рішень не гарантує високої безпомилковості діагностування, але воно дозволяє відсікти малоінформативні параметри стану і тим самим зменшити факторний простір для інших моделей. Як і для решти методів індуктивного моделювання створення адекватних моделей діагностування потребує вибірок експериментальних великих обсягів.

1.3.5. Штучні нейронні мережі

Штучна нейронна мережа [84] – це універсальний апроксиматор, що складається з взаємопов'язаної сукупності простих обчислювальних елементів – нейронів. Кожен елемент мережі функціонує за простими правилами. В більшості типів мереж вихідний сигнал нейрону залежить від зваженої суми вхідних сигналів. В деяких нейронних мережах, наприклад, в багатошаровому персептроні, кожний елемент імітує поведінку окремої клітини головного мозку. В нейронних мережах інших типів, наприклад, в радіально-базисних, функціонування елементів не пов'язано з поведінкою нервових клітин. Фундаментальною властивістю нейронної мережі є здатність до навчання. Нейронну діагностичну модель будують через навчання мережі по вибірці експериментальних даних. Кількість входів нейронної мережі дорівнює числу параметрів стану. Кількість нейронів на вихідному шарі дорівнює числу можливих причин появи тріщини.

Для достовірного діагностування тріщин необхідно враховувати багато параметрів стану, тому нейронна мережа виходить громіздкою. Навчання такої мережі потребує величезної вибірки експериментальних даних, яка для задач діагностування тріщин будівельних конструкцій ще не накопичена. Іншим фактором, що стримує застосування нейронних мереж в діагностиці пошкоджень, є неможливість змістовної інтерпретації процесу прийняття рішення. Нейронну мережу легко навчити, але нейронна мережа не здатна навчити користувача. Крім того, імплементація експертних лінгвістичних правил в нейронну мережу залишається складним процесом, хоча в останні часи в цій області намітився деякий прогрес [4, 34, 64, 84].

1.3.6. Нечітка логіка

Нечітка логіка та теорія нечітких множин [25, 89, 90] – це формальний математичний апарат представлення та використання знань у вигляді природно-мовних висловлювань. Спроби застосування теорії нечітких множин в будівництві розпочалися в 80-х роках. Це роботи з прогнозування надійності та живучості кам'яних будівель в сейсмічних районах [80], з оцінки ступеня пошкоджень землетрусами будівель та споруд [79], з оптимізації конструкцій, які працюють в агресивному середовищі [51] та інші. Найбільш перспективним застосуванням теорії нечітких множин в діагностуванні тріщин є використання систем нечіткого висновку. Спеціальні публікації [4, 36, 54, 62, 64, 71, 88, 90] свідчать, що системи діагностування на нечіткій логіці все більш популярні.

В нечітких діагностичних системах встановлення діагнозу здійснюється шляхом логічного висновку по нечіткій базі знань. Нечітка база знань являє собою сукупність лінгвістичних знань-правил типу:

$$\text{Якщо } x_1 = a \text{ та } x_2 = b \text{ та } x_3 = c, \text{ тоді } D = d, \quad (1.1)$$

де a, b, c, d – слова або словосполучення природної мови.

В правила нечіткої бази знань сконцентровані досвід експерта та його розуміння причинно-наслідкових зв'язків «входи - вихід». Особливістю нечіткого висновку є можливість встановлення діагнозу, коли в базі знань відсутній точний прецедент. Іншими словами, по правилу (1.1) можна відповісти на питання: «Яким буде D , якщо $x_1 = \text{більше } a$ та $x_2 = \text{менше за } b$ та $x_3 = \text{трохи більше за } c$?». Нечіткий висновок можна здійснювати при якісних (лінгвістичних), кількісних та бінарних параметрах стану діагностуемого об'єкта.

Методи навчання нечітких систем [28, 34, 63, 64] значно розширили сферу практичного застосування теорії нечітких множин. Навчання нечітких систем (також як і нейронних мереж) зводиться до пошуку таких значень параметрів моделі діагностування, які мінімізують розбіжність між бажаними та модельними результатами. Але на відміну від нейронних мереж необхідний обсяг навчаючої вибірки є значно меншим. Це досягається за рахунок того, що структура моделі діагностування – нечітка база знань, є для кожної задачі діагностики унікальною, а не універсальною, як в нейронних мережах. Наявність унікальної структури моделі діагностування для кожного класу задач, дозволяє не тільки значно скоротити обсяг навчаючої вибірки але і забезпечити певну робастість, тобто нечутливість моделі до випадкових викидів початкових даних. Підкреслимо, що нечітка база знань може бути легко сформована досвідченим експертом, оскільки вона являє собою сукупність природномовних висловлювань типу:

Якщо	тип конструкції	–	<i>стіна з прорізом,</i>
та	тріщина	–	<i>проходить через всю стіну,</i>
та	вид тріщини	–	<i>коса,</i>
та	направлення розкриття	–	<i>верхнє,</i>
та	ширина розкриття	–	<i>крупна,</i>
та	вимощення	–	<i>відсутнє,</i>
та	грунти	–	<i>неоднорідні,</i>
тоді	причина появи тріщини	–	<i>просідання ґрунту.</i>

Недоліки систем нечіткого висновку пов'язані з трудомісткою процедурою їх навчання за експериментальними даними.

1.3.7. Еволюційне програмування

Еволюційне програмування [82] – це один з модних методів індуктивного синтезу програм (моделей), які віддзеркалюють закономірності в експериментальних даних. Моделі синтезують (вирощують) за принципами природної еволюції з залученням процедур схрещення, мутації та селекції.

Використання еволюційного програмування не вимагає апріорних знань про структуру діагностичної моделі – достатньо мати репрезентативну вибірку експериментальних даних. Зауважимо, що на відміну від нейронних мереж, апріорні знання про структуру діагностичної моделі дозволяють суттєво прискорити ідентифікацію. Як і для нейронних мереж, для побудови адекватних моделей діагностування тріщин навчальна вибірка має бути достатньо велика. Тому пряме використання методів еволюційних обчислень для синтезу моделей діагностування тріщин є передчасним. Звернемо увагу, що один із методів еволюційних обчислень – генетичні алгоритми [64, 81] – є надзвичайно потужним засобом оптимізації. Використання генетичних алгоритмів може бути ефективним при параметричній ідентифікації (навчання) моделей діагностування.

1.3.8. Порівняння методів діагностування тріщин

Порівняння розглянутих вище методів технічного діагностування зведено до табл. 1.1, де А – баєсовський підхід; В – метод найближчого сусіда; С – логічне програмування; D – дерево рішень; Е – нейронні мережі; F – нечітка логіка; G – еволюційне програмування; Y – труднощі наявні; N – труднощі відсутні; S – часткові труднощі.

Таблиця 1.1

Порівняння методів діагностування

Труднощі	Методи						
	A	B	C	D	E	F	G
Збору і обробки статистичної інформації	Y	N	N	N	Y	N	Y
Поповнення моделі	Y	N	N	N	Y	N	Y
Забезпечення стійкості моделі до зашумленості навчальної вибірки	Y	N	N	Y	N	N	S
Врахування якісних параметрів	Y	Y	N	N	Y	N	S
Врахування кількісних параметрів	N	N	Y	N	N	N	N
Імплементатії експертних знань	Y	Y	N	N	Y	N	S
Навчання моделі	Y	N	Y	Y	N	S	N

З табл. 1.1 видно, що найбільш перспективним математичним апаратом для розробки системи діагностування тріщин будівельних конструкцій є нечітка логіка. Застосування нечіткої логіки дає можливість будувати системи діагностування на базі природномовних експертних висловлювань про зв'язок параметрів стану з причинами появи тріщини. Саме такі евристичні знання часто використовуються високодосвідченими будівельниками при встановленні причин пошкодження. Крім того, нечіткі системи є вільними і від решти труднощів, що аналізуються в табл. 1.1.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ

Наводяться основні положення теорії нечітких множин, формулюються принципи діагностування тріщин будівельних конструкцій на базі нечіткої логіки та описуються етапи проектування нечітких діагностичних моделей. З методологічної точки зору матеріал розділу може розглядатися як адаптація на новий об'єкт дослідження ідей медичної діагностики на нечіткій логіці [62, 88] та теорії ідентифікації на основі нечіткого висновку та генетичних алгоритмів [63, 64]. Розділ написано за роботами [43, 47, 65, 77, 87].

2.1. Основні положення теорії нечітких множин

Науковий світ дізнався про теорію нечітких множин 40 років назад, після публікації в журналі «Information and Control» статі «*Fuzzy Sets*» [89] професора Л. Заде. Концепція нечіткої множини викристалізувалась як «незадовільність математичними методами теорії систем, яка вимушувала добиватися штучної точності, що є зайвою для багатьох систем реального світу...» [25]. Основою теорії нечітких множин є ідея про, що елементи з певної множини, які володіють деякою спільною властивістю, можуть володіти нею з різним ступенем, і, відповідно, належати до множини з різним ступенем. При такому підході висловлювання типу “елемент належить певній множині” втрачає сенс, тому що необхідно вказати наскільки сильно, з яким ступенем елемент задовольняє властивостям множини. Базуючись на книжках [9, 38, 64, 90] наведемо основні положення теорії нечітких множин, які необхідні для подальшого викладання матеріалу.

Нечіткою множиною \tilde{A} на універсальній множині U називається сукупність пар $(\mu_A(u), u)$, де $\mu_A(u)$ – ступінь належності елемента $u \in U$ до нечіткої множини \tilde{A} . Ступінь належності – це число з діапазону $[0, 1]$. Чим вище ступінь належності, тим більшою мірою елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої множини.

Функцією належності називається така функція, яка дозволяє обчислити ступінь належності довільного елемента універсальної множини до нечіткої множини.

Якщо універсальна множина складається з кінцевого числа елементів $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, тоді нечітка множина \tilde{A} записується так: $\tilde{A} = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)/u_i$ або $\tilde{A} = (\mu_A(u_1)/u_1, \mu_A(u_2)/u_2, \dots, \mu_A(u_k)/u_k)$. При неперервній множині U використовують таке позначення $\tilde{A} = \int_u \mu_A(u)/u$. Знаки \sum та \int в цих формулах означають сукупність пар $\mu_A(u)$ та u .

Доповненням нечіткої множини \tilde{A} на універсумі U називається нечітка множина $\bar{\tilde{A}}$ з функцією належності $\mu_{\bar{\tilde{A}}}(u) = 1 - \mu_A(u)$ для усіх $u \in U$.

Перетином нечітких множин \tilde{A} та \tilde{B} , які задані на U , називається нечітка множина $\tilde{C} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ з функцією належності $\mu_C(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u))$ для усіх $u \in U$. Операція \min позначається символом \wedge , відповідно: $\mu_C(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u)$.

Об'єднанням нечітких множин \tilde{A} та \tilde{B} , які задані на U , називається нечітка множина $D = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ з функцією належності $\mu_D(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u))$ для усіх $u \in U$. Операція \max позначається символом \vee , відповідно: $\mu_D(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u)$.

Приклади виконання операцій доповнення, перетину та об'єднання над нечіткими множинами наведені на рис. 2.1.

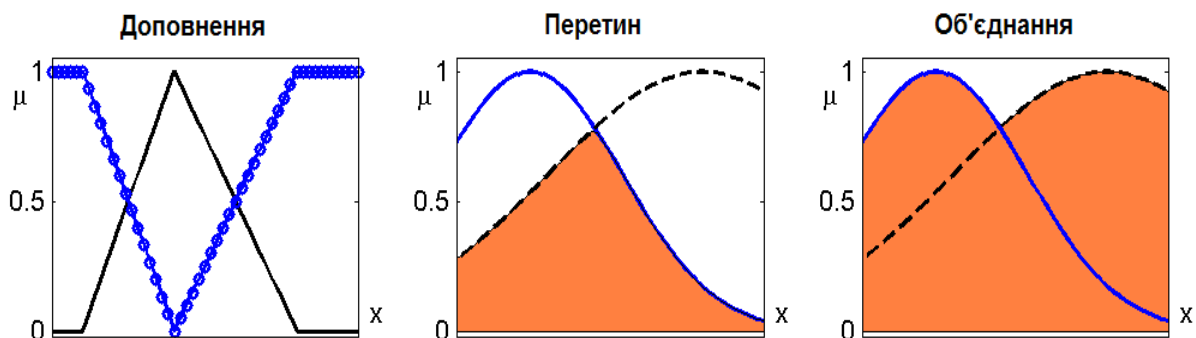


Рис. 2.1. Операції над нечіткими множинами

Лінгвістичною змінною називається така змінна, значеннями якої є слова або словосполучення деякої природної чи штучної мови. Множина усіх можливих значень лінгвістичної змінної називається *терм-множиною*. Кожний елемент терм-множини називається *термом*. В теорії нечітких множин терм задається функцією належності. При побудові функцій належностей за експертними оцінками найбільше поширення отримали методи на основі парних порівнянь [9, 64, 88] та статистичної обробки експертної інформації [9].

Нечітка логіка – це різновид багатозначної логіки, в якій значення істинності задаються лінгвістичними змінними або такими термами лінгвістичною зміною «істинність» як: «дуже істинно», «майже істинно», «трохи хибно» тощо. Ці лінгвістичні значення представляються нечіткими множинами. Правила виконання нечітких логічних операцій отримують з булевих логічних операцій за допомогою принципу нечіткого узагальнення.

Позначимо нечіткі логічні змінні через \tilde{A} і \tilde{B} , а функції належності, що задають істинні значення цих змінних, через $\mu_{\tilde{A}}(u)$ і $\mu_{\tilde{B}}(u)$, $u \in [0,1]$. *Нечіткі логічні операції* ТА (\wedge), АБО (\vee), НІ (\neg) і імплікація (\Rightarrow) виконуються за такими правилами:

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

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

Нечітким висновком називається апроксимація залежності $D = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за допомогою нечітких правил <Якщо – тоді> та нечітких логічних операцій.

2.2. Принципи діагностування тріщин цегляних конструкцій на базі нечіткої логіки

Спираючись на роботи з застосування нечіткої логіки в медичній діагностиці [62, 88] та в теорії ідентифікації [28, 63, 64] сформулюємо ряд методологічних принципів, які будемо використовувати при визначенні причин появи тріщин будівельних конструкцій.

Принцип лінгвістичності вхідних і вихідних змінних. У відповідності з цим принципом, входи об'єкта, що діагностується, і його вихід розглядаються як лінгвістичні змінні, які оцінюються нечіткими термами. В якості прикладу наведемо декілька вхідних лінгвістичних змінних і відповідні терм-множини, які можуть використовуватися в задачі діагностування тріщин:

ВИД ТРІЩИНИ – {вертикальна, коса, горизонтальна},
 НАПРЯМОК РОЗКРИТТЯ – {верхнє, рівномірне, нижнє},
 СТАН КОНСТРУКЦІЇ – {нормальний, послаблений},
 ШИРИНА РОЗКРИТТЯ ТРІЩИН – {волосяна, дрібна, розвинута, велика, крупна}.

Вихідною змінною в цій задачі діагностування може бути:

ПРИЧИНА ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТУ з такими класами рішень {нерівномірне осідання фундаменту, перевантаження, зміна температури, неврахування властивостей матеріалу}.

За допомогою функцій належності, кожен з термів, якими оцінюються лінгвістичні змінні, можна формалізувати нечіткими множинами на відповідному універсумі. Приклад функцій належності термів волосяна (в), дрібна (д), розвинута (р), велика (вел), крупна (кр), що використовуються для лінгвістичної оцінки змінної «Ширина розкриття тріщини», показано на рис. 2.2.

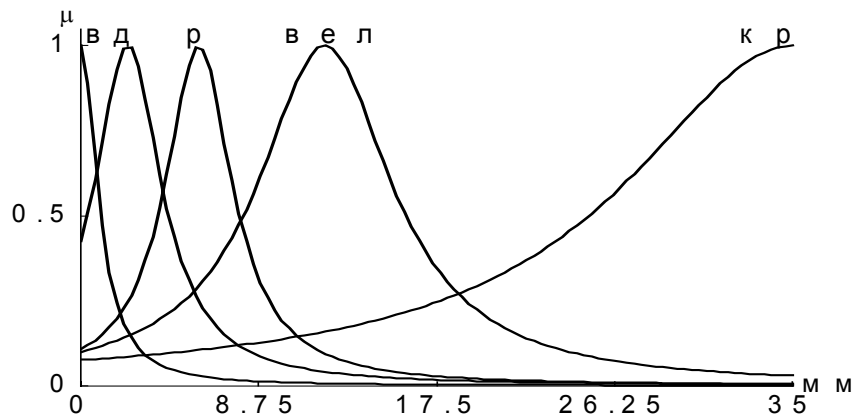


Рис. 2.2. Приклад функцій належності

Принцип формування структури діагностичної залежності «входи – вихід» у вигляді нечіткої бази знань. Нечітка база знань являє собою сукупність правил <Якщо «входи», тоді «вихід»>, які відображають досвід експерта і його розуміння причинно-наслідкових зв'язків. Прикладом експертного правила з нечіткої бази знань для діагностування тріщин цегляних конструкцій може служити таке висловлювання:

Якщо конструкція – стіна глуха,
та вид тріщини – вертикальна,
та розташування тріщини – у верхній частині,
та напрям розкриття – верхнє,
та ширина тріщини – дрібна,
та вимоги до осадового шва – не дотримані,
та ґрунти – слабкі,
тоді причина тріщини – нерівномірне осідання фундаменту.

Формування нечіткої бази знань в [64] трактується як аналог етапу структурної ідентифікації, на якому будується груба модель діагностування з параметрами, що підлягають настроюванню. Крім цього, сукупність правил <Якщо – тоді> можна розглядати як набір експертних точок у просторі «входи - вихід». Застосування нечіткого висновку дозволяє відновлювати по цих точках багатовимірну поверхню «входи - вихід».

Принцип ієрархічності діагностичних знань. Використання цього принципу дозволяє подолати так зване «прокляття розмірності». При великій кількості параметрів стану побудова системи висловлювань «входи – вихід» стає досить складною. Це зумовлено тим, що в оперативній пам'яті людини одночасно утримується не більше 7 ± 2 понять-ознак [85]. В зв'язку з цим доцільно провести ієрархічну класифікацію параметрів стану і по ній побудувати дерево висновку, яке буде визначати систему вкладених одне в одне висловлювань-знань меншої розмірності. Приклад такого дерева для 10 вхідних змінних показано на рис. 2.3.

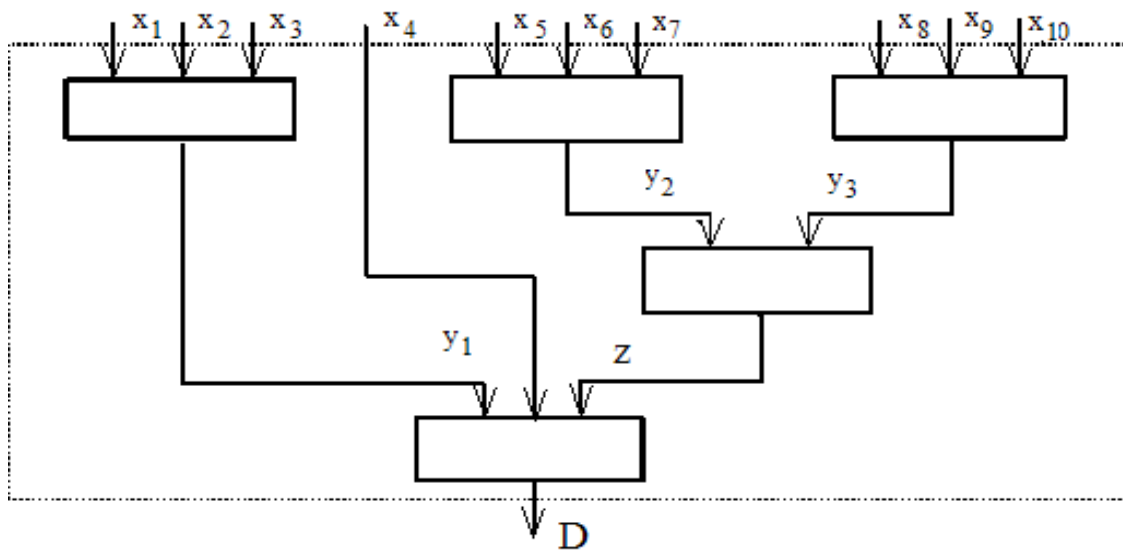


Рис. 2.3. Приклад дерева ієрархічного висновку

З прикладу видно, що знання виду $D=f(x_1, x_2, \dots, x_{10})$ про зв'язок входів $x_1 \div x_{10}$ з виходом D , замінюються послідовністю співвідношень:

$$D=f_1(y_1, x_4, z),$$

$$z=f_3(y_2, y_3),$$

$$y_1=f_2(x_1, x_2, x_3),$$

$$y_2=f_4(x_5, x_6, x_7),$$

$$y_3=f_5(x_8, x_9, x_{10}),$$

де Y_1, Y_2, Y_3, Z – проміжні лінгвістичні змінні.

За рахунок принципу ієрархічності можна враховувати практично необмежену кількість параметрів стану, що впливають на діагноз. При побудові дерева висновку необхідно намагатися, щоб число аргументів (вхідних стрілок) у кожному вузлі дерева не перевищувало 7 ± 2 . Доцільність порівневого представлення експертних знань обумовлена не тільки природною ієрархічністю об'єктів діагностування, але й необхідністю врахування додаткових параметрів стану по мірі накопичення знань про об'єкт. Крім того використання принципу ієрархічності дозволяє спростити правила та зменшити їх кількість.

Принцип трьохваріантної оцінки значень параметрів стану. Суть цього принципу полягає в тому, що оцінка довільного параметра стану може бути здійснена по одному з трьох варіантів: числом, лінгвістичним термом та за принципом термометра. Перший варіант застосовується при можливості кількісної оцінки параметра стану та наявності інструментальних засобів для відповідних вимірювань. Другий варіант застосовується коли значення параметра стану задається лінгвістичною оцінкою з відповідної терм-множини. Прикладом такого параметра є «тип конструкції», який може задаватися на дискретній множині {стіна глуха, стіна з пілястром, простінок, стіна з прорізом}. По третьому варіанту експертна оцінка деякої вхідної змінної здійснюється зафарбовуванням частини шкали (рис. 2.4), ліва і права межа якої відповідають найменшому і найбільшому рівням змінної, що розглядається. Принцип термометра зручно застосовувати у тих випадках, коли експерт не в змозі оцінити деяку змінну ні числом, ні якісним термом, а лише інтуїтивно відчуває її рівень.

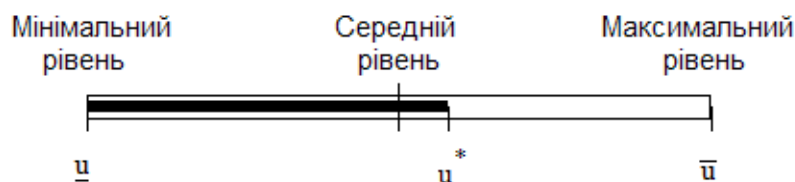


Рис. 2.4. Принцип термометра [64]

Принцип навчання нечітких баз знань. У відповідності з цим принципом побудова моделі діагностування здійснюється у два етапи, які за аналогією з класичними методами [76] можна вважати етапами структурної і параметричної ідентифікації.

Перший етап являє собою формування за доступною експертною інформацією нечіткої бази знань – грубої моделі діагностування. Чим вищий професійний рівень експерта, тим краще адекватність нечіткої моделі діагностування тріщин, побудованої на першому етапі. Однак, співпадання результатів нечіткого висновку (теорія) і експериментальних даних, не є гарантованим. Тому необхідний другий етап, на якому навчають нечітку модель шляхом настроювання її параметрів по експериментальних даних.

Суттю другого етапу ідентифікації є підбір таких ваг нечітких правил з бази знань, і таких параметрів функцій належності, які мінімізують відхилення між експериментальними даними і результатами нечіткого висновку [64]. Навчання нечіткої бази знань зводиться до задачі нелінійної оптимізації, яка може бути вирішена різними методами. Для навчання великих баз знань доцільно використовувати генетичні алгоритми [81], які дозволяють значно ефективніше за звичайні методи математичного програмування (метод найшвидшого спуску, квазіньютонівські методи тощо) [55] розв'язати складні задачі оптимізації. Генетичні алгоритми є аналогом випадкового пошуку, який ведеться одночасно з різних початкових точок з використанням операцій схрещення, мутації та селекції.

2.3. Моделі функцій належності нечітких термів

Практичне застосування теорії нечітких множин передбачає представлення параметрів стану у вигляді лінгвістичних змінних. Формалізація лінгвістичних значень в рамках теорії нечітких множин здійснюється через функції належності. Найбільш розповсюджені методи побудови функцій належностей ґрунтуються на статистичній обробці експертної інформації [9] та на парних порівняннях [9, 64, 88]. Ці методи застосовуються переважно при розробці чистих експертних систем, які використовують лише експертні знання. Останнім часом швидкими темпами розвиваються системи підтримки прийняття рішень з механізмами навчання. В таких системах експертні знання використовуються для формування грубої моделі прийняття рішень (в тому числі і грубих функцій належності), а її навчання здійснюється по експериментальних даних.

Функції належності зручно представляти в параметричній формі. Зазвичай функція належності має 2, 3 або 4 параметри. Існує багато типів параметричних функцій належностей, найбільш розповсюдженими серед яких є трикутна, трапецієвидна та дзвіноподібна [9, 90]. Аналітичні вирази цих функцій зведені в табл. 2.1. Графіки цих функцій належності наведені на рис. 2.5. Трикутна модель функції належності потребує трьох параметрів, якими є координати максимуму (b) та мінімумів (a та c). Трапецієвидна модель функції належності потребує чотирьох параметрів, якими є координати максимумів (b та c) та мінімумів (a та d). Дзвіноподібна модель функції належності потребує двох параметрів, якими є координата максимуму (b) та коефіцієнт концентрації функції належності (c). Дзвіноподібна модель функції належності має лише 2 параметри, тому при її використанні зменшується розмірність оптимізаційної задачі, яка виникає при навчанні нечіткої моделі. Зазначимо, що дзвіноподібна модель функції забезпечує достатню “гнучкість” представлення нечіткої інформації (див. рис. 2.5).

Таблиця 2.1

Моделі функцій належності

Назва	Аналітичний вираз	Інтерпретація параметрів
Трикутна	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ або } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases}$	(a, c) – носій нечіткої множини; b – координата максимуму.
Трапецієвидна	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ або } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \end{cases}$	(a, d) – носій нечіткої множини; [b, c] – ядро нечіткої множини.
Дзвіноподібна	$\mu_t(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}$	b – координата максимуму; c – коефіцієнт концентрації.

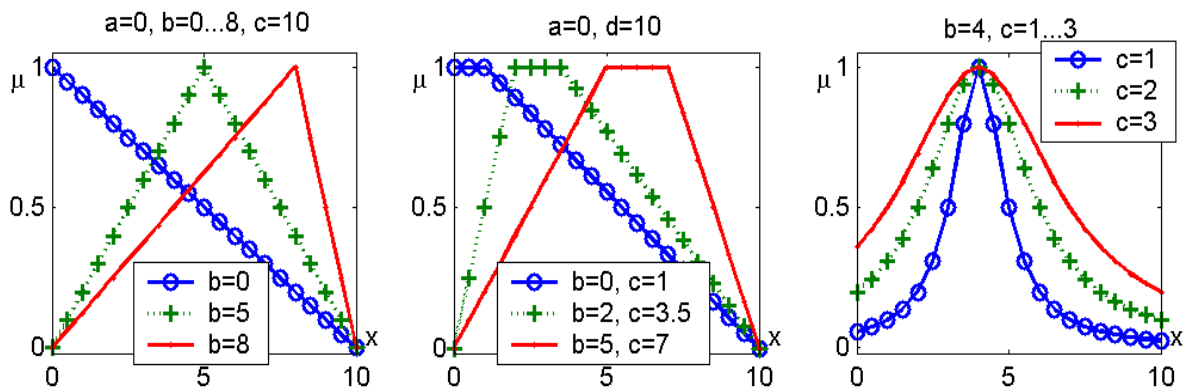


Рис. 2.5. Популярні функції належності

2.4. Нечіткі бази знань

Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил <Якщо – тоді>, які віддзеркалюють взаємозв’язок між входами та виходом досліджуємого об’єкта. Формат нечітких правил такий:

Якщо <антецедент правила>, тоді <консеквент правила>.

Антецедент правила або являє собою твердження типу « x є високим», де «високий» – це терм, що заданий нечіткою множиною на універсальній множині лінгвістичної змінної x . *Консеквент* правила – це твердження типу « $D \in d$ ». Для задач діагностування значення вихідної змінної задається класом рішень, наприклад « D є статичне перевантаження».

Багатовимірні залежності “параметри стану – причина тріщини” доцільно задавати нечіткими правилами з логічними операціями ТА і АБО. Правила зручно формувати так, щоб всередині змінні поєднувалися по ТА, а в базі знань правила з’єднувалися логічною операцією АБО. В цьому випадку діагностична база знань про зв’язок параметрів стану $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ з причиною D появи тріщини задається таким чином:

Якщо $x_1 = a_1^{j1}$ та $x_2 = a_2^{j1}$ та ... та $x_n = a_n^{j1}$ з вагою w_{j1} , або
 $x_1 = a_1^{j2}$ та $x_2 = a_2^{j2}$ та ... та $x_n = a_n^{j2}$ з вагою w_{j2} , або
 ... або
 $x_1 = a_1^{jk_j}$ та $x_2 = a_2^{jk_j}$ та ... та $x_n = a_n^{jk_j}$ з вагою w_{jk_j} ,
тоді $D = d_j$ $j = \overline{1, m}$,

де a_i^{jp} – нечіткий терм, що оцінює значення фактора x_i в правилі з номером jp , $j = \overline{1, m}$, $p = \overline{1, k_j}$, $i = \overline{1, n}$;

d_j – класи рішень (причини появи тріщини) $j = \overline{1, m}$;

m – кількість можливих класів рішень;

k_j – число правил, в яких $D = d_j$, $j = \overline{1, m}$;

$w_{jp} \in [0, 1]$ – ваговий коефіцієнт, який відповідає впевненості експерта в достовірності правила з номером jp , $j = \overline{1, m}$, $p = \overline{1, k_j}$.

Наведену вище нечітку базу знань часто представляють таблицею, яку ще називають матрицею знань (табл. 2.2). За допомогою операцій \cup (АБО) і \cap (ТА) нечітку базу запишемо у компактній формі:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \text{ з вагою } w_{jp} \right] \rightarrow D = d_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.1)$$

Таблиця 2.2

Нечітка база знань

x_1	x_2	...	x_n	w	y
a_1^{11}	a_2^{11}	...	a_n^{11}	w_{11}	d_1
a_1^{12}	a_2^{12}	...	a_n^{12}	w_{12}	
...	
$a_1^{1k_1}$	$a_2^{1k_1}$	...	$a_n^{1k_1}$	w_{1k_1}
a_1^{21}	a_2^{21}	...	a_n^{21}	w_{21}	d_2
a_1^{22}	a_2^{22}	...	a_n^{22}	w_{22}	
...	
$a_1^{2k_2}$	$a_2^{2k_2}$	...	$a_n^{2k_2}$	w_{2k_2}
...					
a_1^{m1}	a_2^{m1}	...	a_n^{m1}	w_{m1}	d_m
a_1^{m2}	a_2^{m2}	...	a_n^{m2}	w_{m2}	
...	
$a_1^{mk_m}$	$a_2^{mk_m}$	...	$a_n^{mk_m}$	w_{mk_m}

При великій кількості параметрів стану доцільно використовувати ієрархічно пов'язані бази знань, в яких вихідна змінна однієї бази знань є вхідною для бази знань вищого рівня ієрархії. Особливістю діагностування тріщин будівельних конструкцій є те, що для прийняття правильного рішення не завжди необхідно знання значень усіх факторів. Для цих випадків правила діагностування можна представити в "неповному форматі", не розглядаючи параметри стану, що не впливають на прийняття рішення. Для врахування такої особливості нами пропонується в нечітких базах знань позначати знаком « \rightarrow » змінні, що можуть приймати довільні значення без порушення істинності відповідного правила

2.5. Нечіткий логічний висновок

Моделювання на основі нечітких баз знань здійснюється через нечіткий логічний висновок. Загальна архітектура системи нечіткого висновку показана на рис. 2.6.

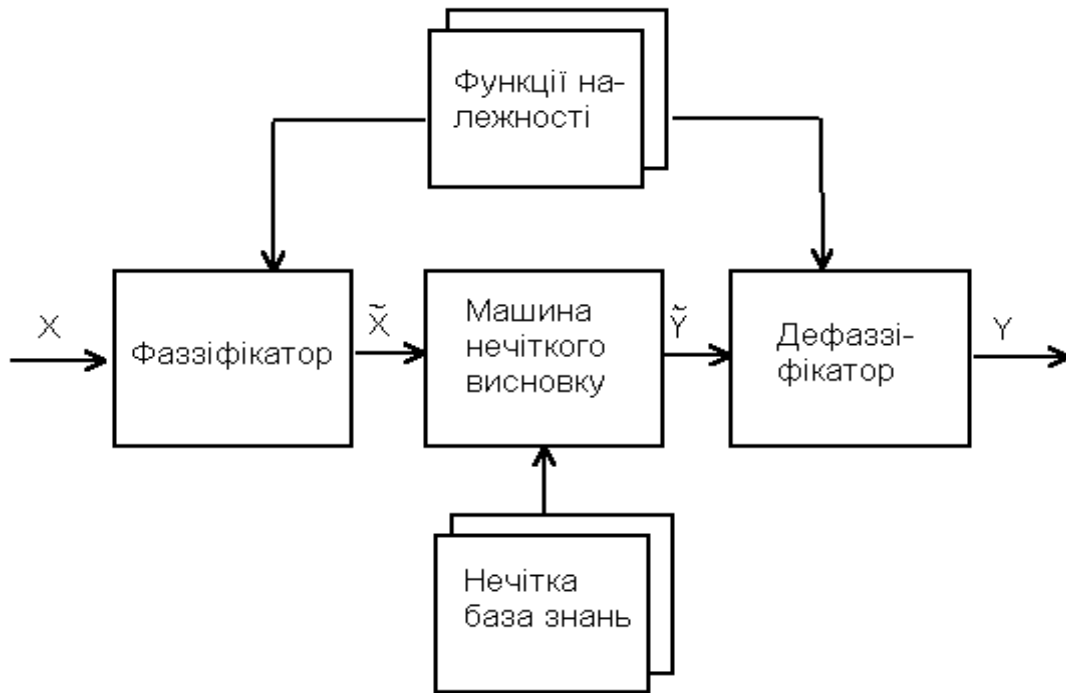


Рис. 2.6. Типова архітектура системи нечіткого висновку

Блоки системи виконують такі функції:

- «Фаззифікатор» перетворює вектор (X) значень параметрів стану в вектор (\tilde{X}) ступенів належності параметрів стану до нечітких термів;
- «Функції належності» являє собою бібліотеку аналітичних залежностей та параметрів функцій належностей, якими формалізуються лінгвістичні терми з нечітких правил;
- «Нечітка база знань» являє собою сукупність експертних лінгвістичних правил типу <Якщо – тоді>, які формалізовані засобами теорії нечітких множин;
- «Машина нечіткого висновку» визначає значення вихідної змінної у вигляді нечіткої множини (\tilde{Y});
- «Дефаззифікатор» перетворює нечіткий розв'язок (\tilde{Y}) в чіткий (Y).

У відповідності до [62] нечіткий висновок проводиться по системі нечітких логічних рівнянь. Вони будуються по нечітких базах знань. По системі нечітких рівнянь розраховуються ступені належностей різних діагностів при фіксованих значеннях параметрів стану. Як причина появи тріщини обирається рішення з максимальним ступенем належності.

Для переходу від нечіткої бази знань (2.1) до системи нечітких логічних рівнянь введемо такі позначення:

$\mu^{a_i^{jp}}(x_j)$ – функція належності змінної x_j до нечіткого терма a_i^{jp} ($j=\overline{1,m}$, $p=\overline{1,k_j}$, $i=\overline{1,n}$);

$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція належності вектора параметрів (x_1, x_2, \dots, x_n) до рішення d_j , $j = \overline{1, m}$.

Згідно до [62] зв'язок між цими функціями представляється ізоморфною до нечіткої бази знань системою нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left(w_{pj} \cdot \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right), \quad j = \overline{1, m}, \quad (2.2)$$

де $\bigvee(\bigwedge)$ – операція максимуму (мінімуму).

Підставляючи у (2.2) вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ значень факторів впливу, отримуємо таку нечітку множину вихідної змінної:

$$\tilde{y} = \left(\frac{\mu^{d_1}(X)}{d_1}, \frac{\mu^{d_2}(X)}{d_2}, \dots, \frac{\mu^{d_m}(X)}{d_m} \right). \quad (2.3)$$

Як розв'язок обирається діагноз з максимальним ступенем належності:

$$y = \arg \max_{\{d_1, d_2, \dots, d_m\}} (\mu_{d_1}(X), \mu_{d_2}(X), \dots, \mu_{d_m}(X)). \quad (2.4)$$

Ступені належностей поточних значень факторів $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ до нечітких термів з бази знань, розраховуються за формулами з табл. 2.1. Якщо значення параметрів стану задано нечіткою множиною \tilde{x}_i , тоді ступінь її належності до нечіткої множини a_i^{jp} з бази знань (2.1) розраховується як висота перетину цих нечітких множин [90]:

$$\mu^{jp}(\tilde{x}_i) = \text{height}(a_i^{jp} \cap \tilde{x}_i) = \sup_{x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]} \min(\mu^{jp}(x_i), \mu^{\tilde{x}_i}(x_i)). \quad (2.5)$$

Розрахунок ступеня належності нечіткої множини \tilde{A} до нечіткої множини \tilde{B} за формулою (2.5) ілюструє рис. 2.7.

Нечіткий висновок по ієрархічній базі знань здійснюється без виконання фаззифікації та дефаззифікації для проміжних змінних (на рис. 2.3 це змінні u_1, u_2, u_3 та z). Результат логічного висновку у вигляді нечіткої множини (2.3) напряму передається в машину нечіткого висновку наступного рівня ієрархії. Таким чином, в ієрархічних базах знань для вичерпного опису проміжних лінгвістичних змінних достатньо вказати лише термножини; побудова функцій належності для них є зайвою.

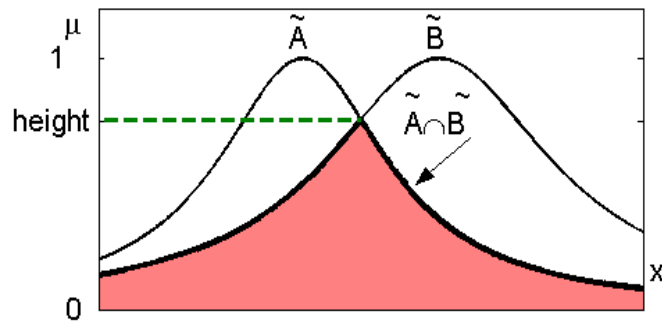


Рис. 2.7. До формули (2.5)

2.6 Навчання нечіткої моделі

Навчання нечіткої моделі полягає в знаходженні таких її параметрів, що мінімізують розбіжність між експериментальними даними та модельними результатами. Згідно до [63, 64] в нечіткій моделі настроюють параметри функцій належності термів та вагові коефіцієнти нечітких правил.

2.6.1. Постановка задачі навчання

Введемо такі позначення, які необхідні для математичної постановки задачі навчання:

n – кількість частинних параметрів стану;

x_i – частинний параметр стану з порядковим номером i ($i = \overline{1, n}$);

d_1, d_2, \dots, d_m – можливі причини появи тріщини;

num_t – загальна кількість нечітких термів, що використовуються для лінгвістичної оцінки частинних параметрів стану;

num_r – загальна кількість правил в ієрархічно пов'язаних нечітких базах знань;

b_1 та c_1 – параметри функції належності – координата максимуму та коефіцієнт концентрації 1-го нечіткого терма;

$B = (b_1, b_2, \dots, b_{\text{num}_t})$ та $C = (c_1, c_2, \dots, c_{\text{num}_t})$ – вектори параметрів функцій належності;

w_v – ваговий коефіцієнт v -го правила ($v = \overline{1, \text{num}_r}$);

$W = (w_1, w_2, \dots, w_{\text{num}_r})$ – вектор вагових коефіцієнтів нечітких правил;

(X^r, d^r) – навчальна вибірка, що являє собою сукупність експериментальних пар параметри стану $X^r = (x_1^r, x_2^r, \dots, x_n^r)$ та верифікована причина виникнення тріщини $d^r \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, $r = \overline{1, M}$, M – розмір навчальної вибірки.

Особливістю навчальної вибірки є те, що значення деяких параметрів стану задані лінгвістичними термами з подальшим представленням у вигляді нечітких множин, тобто навчальна вибірка є нечіткою. Використання нечіткої вибірки обумовлено тим, що значення деяких параметрів не можуть бути виміряні кількісно, а можуть бути оцінені лише лінгвістично. Застосування нечіткої навчальної вибірки є новим підходом в настроюванні нечітких систем. Методи навчання з робіт [28, 34, 63, 64, 88] вимагають представлення параметрів стану в кількісній формі.

Згідно до [28, 64, 88] задача навчання нечіткої моделі з дискретним виходом зводиться до розв'язання такої задачі оптимізації: *знайти такий вектор (B, C, W) , що забезпечує:*

$$\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (q(X^r, d^r, B, C, W))^2} \rightarrow \min, \quad (2.6)$$

де $q(X^r, d^r, B, C, W)$ – розбіжність між експериментальним виходом d^r та результатом нечіткого логічного висновку за моделлю, що задана вектором (B, C, W) для об'єкта X^r .

Є декілька способів розрахунку розбіжності $q(X^r, d^r, B, C, W)$ [77], серед яких зазвичай використовують такий [64, 88]:

$$q(X^r, d^r, B, C, W) = \sum_{j=1, m} \left(\mu^{d_j}(d^r) - \mu^{d_j}(X^r, B, C, W) \right)^2,$$

де $\mu^{d_j}(X^r, B, C, W)$ – ступені належності результату нечіткого висновку за моделлю, що задана вектором (B, C, W) , для об'єкта X^r до причин d_j ($j = \overline{1, m}$); значення цих ступенів належностей розраховуються за (2.2);

$\mu^{d_j}(d^r)$ – ступені належності експериментально визначеної причини появи тріщини d^r до нечітких термів d_j , $j = \overline{1, m}$; згідно до [64, 88] вони визначаються так:

$$\mu^{d_j}(d^r) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d_j = d^r \\ 0, & \text{якщо } d_j \neq d^r \end{cases}$$

Для забезпечення прозорості нечіткої моделі після навчання на керуванні змінні в задачі оптимізації (2.6) накладемо такі обмеження:

- координати вектора W повинні знаходитись в одиничному інтервалі: $w_v \in [0,1]$, $v = \overline{1, \text{num_r}}$;
- координати вектора V повинні знаходитись всередині діапазону можливих значень відповідного частинного параметра стану;
- координати вектора V не повинні порушувати умови лінійної упорядкованості терм-множин;
- координати вектора C повинні бути додатними: $c_l > 0$, $l = \overline{1, \text{num_t}}$.

Для зменшення розмірності задачі оптимізації (2.6) координати максимумів функцій належності доцільно настроювати лише для не крайніх лінгвістичних термів “Нижче середнього”, “Середній”, “Вище Середнього” тощо. Координати максимумів функцій належності крайніх термів типу “Низький” та “Високий” встановимо такими, як діапазони зміни відповідних частинних параметрів стану.

2.6.2. Генетичний алгоритм навчання нечіткої моделі

Задача навчання (2.6) являє собою задачу нелінійної оптимізації. Використання для цієї задачі класичних методів математичного програмування [55] пов'язано зі значними витратами комп'ютерного часу через те, що означені методи орієнтовані на пошук лише локального екстремуму. Останнім часом все більше популярні генетичні алгоритми [64, 81], які розв'язують складні задачі глобальної оптимізації значно ефективніше за традиційні методи математичного програмування.

Генетичні алгоритми – це узагальнення методів випадкової оптимізації на одночасний пошук з множини початкових точок. В основу генетичних алгоритмів покладена імітація еволюційних процесів, що відбуваються в живій природі. Для розв'язання конкретної задачі оптимізації за допомогою генетичних алгоритмів необхідно визначити правила виконання генетичних операцій кодування (декодування) розв'язків, схрещення, мутації та селекції.

Генетичне кодування

В результаті генетичного кодування кожний варіант рішення представляється хромосомою. Хромосома – це послідовність генів (символів пе-

вної природи), кожний з яких відповідає за деяку ознаку розв’язку задачі. Сукупність хромосом утворює популяцію, над якою ітераційно виконуються операції схрещення, мутації та селекції. На кожній ітерації обираються найбільш вдалі хромосоми, які покращують популяцію, що в кінці - кінців приводить до знаходження глобального оптимуму.

У відповідності з основними ідеями генетичних алгоритмів варіант рішення необхідно представити хромосомою – стрічкою символів певної природи. На нашу думку, найбільш вдалим способом генетичного кодування є співставлення кожній чарунці хромосоми (гену) однієї координати вектора керованих змінних. Тоді хромосома буде являти собою рядок дійсних чисел, що зображена на рис. 2.8. З рисунку видно, що перші num_t генів відповідають координатам максимумів функцій належностей нечітких термів, гени з порядковими номерами від num_t+1 до $2 \cdot num_t$ – коефіцієнтам концентрації функцій належностей, а останні num_r генів – ваговим коефіцієнтам правил нечітких баз знань.

b_1	b_2	...	b_{num_t}	c_1	c_2	...	c_{num_t}	w_1	w_2	...	w_{num_r}
-------	-------	-----	--------------	-------	-------	-----	--------------	-------	-------	-----	--------------

Рис. 2.8. Генетичне кодування

Схрещення

Схрещення – це генетична операція, в результаті якої отримуються дві хромосоми-нащадки, що спадкують властивості хромосом-батьків. Для виконання цієї операції нами пропонується використовувати схрещення на базі однієї точки обміну в середині генів (див. рис. 2.9). Хромосоми-нащадки є лінійної комбінацією хромосом-батьків при $\lambda \in [0,1]$. В цьому випадку схрещення з подальшою селекцією може інтерпретуватися як аналог експлуатації найкращих розв’язків.

Хромосоми - батьки	a_1	a_2	...	a_M
	b_1	b_2	...	b_M
⇓				
Хромосоми - нащадки	$\lambda \cdot a_1 + (1-\lambda) \cdot b_1$	$\lambda \cdot a_2 + (1-\lambda) \cdot b_2$	...	$\lambda \cdot a_M + (1-\lambda) \cdot b_M$
	$\lambda \cdot b_1 + (1-\lambda) \cdot a_1$	$\lambda \cdot b_2 + (1-\lambda) \cdot a_2$	...	$\lambda \cdot b_M + (1-\lambda) \cdot a_M$

Рис. 2.9. Схрещення хромосом

Мутація

Мутація – це генетична операція, в результаті якої один ген хромосоми змінюється випадковим чином. Для виконання мутації необхідно випадковим чином обрати хромосому та ген, що підлягають мутації, та змінити алею (значення гена). Нове значення гена генерується як випадкове число з відповідного діапазону. Ілюстрація мутації наведена на рис. 2.10. Мутація дозволяє розширити область пошуку, тим самим забезпечує вихід алгоритму з локальних оптимумів.



Рис. 2.10. Мутація хромосоми

Селекція

Селекція являє собою процедуру формування нової популяції з найбільш пристосованих хромосом. В нову популяцію відбираються хромосоми з найбільшим значенням фітнес-функції. Значення фітнес-функції вказує на міру відповідності хромосоми бажаному розв'язку. Чим більше значення фітнес-функції, тим ближче хромосома до оптимуму. У відповідності до [81] селекцію будемо проводити за методом колеса рулетки з елітизмом. Спочатку в нову популяцію обирається найкраща хромосома (еліта). Решта хромосом обирається через колесо рулетки. Кожній хромосомі на колесі рулетки відповідає свій сектор, площа якого пропорційна значенню її фітнес-функції. Для вибору хромосоми в нову популяцію необхідно кинути шарик на колесо рулетки і визначити на якому секторі він спиниться. Алгоритм селекції наведено нижче:

Крок 1. Позначити через K – розмір популяції, над якою буде проведено селекцію та через s – кількість хромосом, які необхідно відібрати в нову популяцію.

Крок 2. Розрахувати значення фітнес-функції $f(A_i)$ для всіх хромосом A_i ($i=\overline{1,K}$) поточної популяції.

Крок 3. Включити в нову популяцію хромосому з найбільшим значенням фітнес-функції.

Крок 4. Розрахувати ймовірність включення хромосом A_i до нової популяції за формулою $p(A_i) = \frac{f(A_i)}{\sum_{j=1, K} f(A_j)}$, ($i=\overline{1, K}$).

Крок 5. Розрахувати кумулятивну ймовірність включення хромосом A_i до нової популяції за формулою $q(A_i) = \sum_{j=1, \overline{i}} p(A_j)$, ($i = \overline{1, K}$).

Крок 6. Згенерувати випадкове число r з діапазону $[0, 1]$.

Крок 7. Знайти хромосому $A \in \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$ з найбільшим порядковим номером, для якої $q(A) \leq r$.

Крок 8. Ввести в нову популяцію хромосому A , що знайдена на попередньому кроці.

Крок 9. Повторити кроки 6-8 рівно $(s-1)$ раз.

Наведена реалізація селекції може бути застосована при пошуку максимуму невід'ємної функції, тому як фітнес-функцію будемо використовувати функцію обернену до (2.6).

Генетичний алгоритм

Для навчання нечіткої моделі будемо використовувати такий генетичний алгоритм.

Крок 1. Встановити параметри генетичного алгоритму: `pop_size` – розмір популяції; `cross_num` – кількість схрещень за одну епоху; `mut_num` – кількість мутацій за одну епоху; `gene_mut` – кількість генів, що змінюються за одну мутацію; `epoch_num` – кількість епох генетичного алгоритму.

Крок 2. Виконати генетичне кодування.

Крок 3. Випадковим чином згенерувати початкову популяцію з `pop_size` хромосом.

Крок 4. Розрахувати значення фітнес-функції для всіх хромосом.

Крок 5. Випадковим чином обрати `cross_num` пар хромосом-батьків та провести схрещення.

Крок 6. Випадковим чином обрати `mut_num` хромосом та провести мутацію шляхом зміни значень `gene_mut` генів в кожній хромосомі. Нові значення генів та порядкові номери генів обрати випадково.

Крок 7. Перевірити нові хромосоми на відповідність обмеженням на керовані змінні та при необхідності відкоригувати генотип.

Крок 8. Розрахувати значення фітнес-функції для нових хромосом.

Крок 9. Знайти найкращу хромосому i включити її в нову популяцію.

Крок 10. Шляхом селекції за методом колеса рулетки обрати в нову популяцію (pop_size-1) хромосому.

Крок 11. Повторити `epoch_num` раз кроки 5-10.

Крок 12. Декодувати найкращий розв'язок (хромосому).

2.6.3. Перевірка адекватності діагностичної моделі

Для визначення адекватності діагностування потрібно протестувати систему та порівняти результати моделювання з дійсними причинами виникнення тріщин. Для запобігання перенавчанню нечіткої моделі об'єкти в навчальній та тестовій вибірках повинні бути різними. Звичайно, обидві вибірки мають бути репрезентативними.

Позначимо через: N – кількість тріщин з верифікованими причинами; N_i – кількість тріщин, об'єктивною причиною виникнення яких є d_i ; N_{ij} – кількість тріщин, для яких теоретичний (за нечіткою моделлю) діагноз є d_j , а дійсною причиною їх виникнення є d_i . Тоді статистичні оцінки якості діагностування визначаються таким чином [62]:

$$\hat{p}_{ii} = \frac{N_{ii}}{N_i} - \text{оцінка ймовірності прийняття рішення } d_i \text{ при умові}$$

об'єктивної необхідності прийняття рішення d_i ;

$$\hat{p}_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} - \text{оцінка ймовірності прийняття рішення } d_j \text{ при умові}$$

об'єктивної необхідності прийняття рішення d_i ;

$$\hat{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, m} N_{ii} - \text{оцінка ймовірності безпомилкового діагностування}$$

по всіх можливих причинах появи тріщини.

РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ТРІЩИН ЦЕГЛЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

Для проектування інтелектуальної частини системи діагностування тріщин необхідні такі знання: 1) перелік можливих причин появи тріщин; 2) дерево нечіткого висновку; 3) база нечітких правил <Якщо – тоді>; 4) навчальна вибірка. Узагальнений процес перетворення цих знань в систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень описано в розділі 2. В цьому розділі розроблюється система діагностування тріщин цегляних конструкцій будівель. Проектування системи описується детально, що дає змогу створювати аналогічні системи з діагностування пошкоджень інших об'єктів. Розділ написана на базі статей [40-44, 46, 87].

3.1. Типи діагностичних рішень

Тріщини в конструкціях є зовнішнім проявом їхнього перевантаження та деформації. Причини, що призводять до появи тріщин у цегляних конструкціях, будемо класифікувати таким чином:

- статичне перевантаження (d_1);
- динамічне перевантаження (d_2);
- особливе перевантаження (d_3);
- дефекти фундаментів та деформації основи (d_4);
- температурні деформації (d_5);
- порушення технології будівельних процесів або неврахування властивостей матеріалу (d_6).

Запропонована класифікація причин появи тріщини є максимально глибокою для ранніх етапів обстеження будівлі при використанні експертами інформацію, що здобута візуально або за допомогою простих вимірювальних інструментів (рулетки, мірної лінійки або штангенциркуля). Зазначену глибину діагностування можна завжди досягти при візуальному обстеженні, а для більш деталізованого діагностування необхідні додаткові обстеження, вимірювання та розрахунки. Визначення класу причин на

ранніх етапах обстеження дає змогу звузити зону пошуку, таким чином зменшити витрати на встановлення причини появи тріщини. Розглянемо причини виникнення тріщин більш детально.

3.1.1. Статичне перевантаження

У групу статичного перевантаження включаємо всі ушкодження, для яких допустимі напруги в розрахунках перевищили межу міцності без виникнення при цьому непередбаченого додаткового впливу [60]. Перевантаження від струсів, деформацій та осадки фундаменту розглядаються окремо. Таким чином, до групи статичного перевантаження віднесені такі причини [7, 60, 74, 75]:

- 1) збільшення ваги будівельних конструкцій (колон, стін тощо). Наприклад, надбудова додаткового поверху; перебудова будівлі із застосуванням більш важких стін або перекриття; збільшення кількості стін (перегородок); зміна корисного навантаження через встановлення додаткового обладнання;
- 2) помилки проектування з неврахування вітрового навантаження або помилкові розрахунки окремих навантажень;
- 3) перевантаження через послаблення кладки через невиконання конструктивних вимог. Наприклад, недотримання перев'язки цегли, стовщення швів, застосування забутовки стін та простінків цегляним боєм та використання цегли і розчину низької якості (бракованої цегли); погане заповнення вертикальних швів; відхилення стін, простінків та стовпів від вертикалі, послаблення простінків через підрізки перерізу дерев'яними коробами, що виготовлені не за стандартами; пробивання непередбачених отворів будь-якого призначення (технологічних, монтажних тощо); розташування балок ексцентрично відносно діючого навантаження; відсутність розподільної обв'язки або елементів жорсткості;
- 4) неякісна або повна відсутність перев'язки несучих цегляних пілястр зі стінами; занижена несуча спроможність пілястр, а також відсутність опорних залізобетонних подушок під несучими конструкціями або наявність подушок низької якості.

3.1.2. Динамічне перевантаження

Динамічні навантаження виникають при нерегулярних ударах, рівномірних коливаннях та вібраціях [30, 60]. Причиною динамічних перевантажень можуть стати:

- 1) механізми, що працюють;

- 2) будівельні машини (копри, трамбівки, екскаватори, вібратори, вібротрамбівки);
- 3) інтенсивний рух транспорту.

3.1.3. Особливе перевантаження

До групи особливого перевантаження віднесемо одиничні удари і струси від:

- 1) вибуху у будівлі;
- 2) вибуху поблизу будівлі чи споруди;
- 3) віддаленого вибуху;
- 4) землетрусу;
- 5) стихійного лиха.

3.1.4. Дефекти фундаментів та деформації основи

Від якості робіт по зведенню фундаментів залежить стійкість та довговічність будь-якої споруди. Однак більшість ушкоджень пов'язані з дефектами основи та фундаментів, що виникають через [2, 11, 18,72]:

- 1) низьку несучу спроможність ґрунту (до якого відносять суглинки, мули, просадочні ґрунти);
- 2) наявність ґрунту, що зривається, та порушення, які спричинені заморожуванням таких ґрунтів через несвоєчасні засипку пазах та захист основи під фундамент від промерзання;
- 3) невиконання вимог щодо вертикального планування будівельного майданчика та організованого поверхневого водовідводу;
- 4) неповноцінність або помилковість інженерно-геологічних розвідок;
- 5) дію карстово-суфозійних процесів із можливим утворенням провальних вирв у зоні розташування будівлі;
- 6) наявність території, що підроблюється або підроблювалась;
- 7) порушення технології виробництва земляних робіт: механічні ушкодження ґрунту основи при розробці землерийними машинами; незадовільне виконання уступів підшви фундаментів; недостатнє ущільнення ґрунтів як по якості, так і за розміром; неякісне влаштування ґрунтових подушок; неякісне влаштування фундаментів у витрамбованих котлованах; затоплювання котловану, що веде до перезволоження та розрідження ґрунту; відкачування й пониження рівня ґрунтових вод при недостатньому кріпленні стінок котловану, що спричиняє винесення ґрунту з-під фундаментів поблизу розташованих будівель;

- 8) зміну фізико-механічних властивостей ґрунтів при підйомі або пониженні рівня ґрунтових вод;
- 9) зміну гідрогеологічних умов при благоустрої території (відведення підземних вод і рік у систему колекторів або навпаки, спуску на територію будівництва агресивних виробничих вод, які, проникаючи у ґрунт, діють негативно на підземні споруди);
- 10) виконання пальових робіт або робіт, пов'язаних з ущільненням фундаментів, на відстані менше допустимої від існуючих будівель і споруд;
- 11) відсутність організованих водостоків або вимощення та аварій підземних комунікацій (водогону, каналізації), що призводять до водонасичення та розрідження ґрунту;
- 12) поширення лесових ґрунтів;
- 13) наявність поблизу джерел можливого замочування, наприклад водоемнісних резервуарів у безпосередній близькості від будівлі;
- 14) зміну несучої спроможності ґрунтів при замочуванні.

3.1.5. Температурні деформації

Усі будівельні матеріали змінюють свої лінійні розміри в залежності від температури зовнішнього повітря [60]. Ушкодження, що обумовлені температурним впливом, виникають: 1) якщо будівельні матеріали, які мають різні специфічні розміри деформації, міцно з'єднані в одну будівельну деталь та попадають під вплив однакових температурних змін; 2) якщо загальна зміна довжини будівельних деталей, що складається з однакових (а також різних) матеріалів, обмежена зовнішніми перешкодами. Зазвичай такі випадки обумовлені відсутністю необхідної кількості температурних швів або їх низькою якістю.

3.1.6. Порушення технології будівельних процесів або неврахування властивостей матеріалів

До цієї групи причин відносяться [2, 11, 18, 66, 72]:

- 1) використання цегляних матеріалів не за призначенням, наприклад, використання силікатної цегли в будівлях із підвищеною вологістю;
- 2) порушення, що пов'язані з низькою якістю виробництва робіт, що виконуються в осінньо-зимовий період через:
 - низьке адгезійне зчеплення металу з розчином і з кладкою при прокладці арматурних сіток;

- відсутність контролю за фактичною міцністю у швах цегляної кладки при природному весінньому відтаюванні, що призводить до перевантаження вузьких простінків;
 - застосування при від'ємній температурі шлакопортландцементу, пуцоланового цементу замість портландцементу;
 - застосування при зимовій кладці цегли заниженої якості;
- 3) сумісне застосування різнорідних по міцності, водопоглинанню й довговічності матеріалів для несучої конструкції, наприклад, силікатна цегла в поєднанні із шлакоблоками;
- 4) різна деформативність стін.

3.2. Ієрархічна класифікація параметрів стану

Ієрархічний зв'язок параметрів стану з причиною виникнення тріщини (D) представимо деревом логічного висновку (рис. 3.1), яке визначає структуру діагностичної моделі. Вершини дерева інтерпретуються таким чином [64]: корінь дерева – показник, що діагностується; термінальні вершини – частинні параметри стану; нетермінальні вершини (подвійні кола) – згортка частинних параметрів стану в укрупнені. Дуги, що виходять з нетермінальних вершин дерева, відповідають укрупненим параметрам стану.

Наведеному на рис. 3.1 дереву логічного висновку відповідає така система співвідношень:

$$D = f_D(x_1, x_2, y_1, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, y_3), \quad (3.1)$$

$$y_1 = f_{y_1}(x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, y_2), \quad (3.2)$$

$$y_2 = f_{y_2}(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}), \quad (3.3)$$

$$y_3 = f_{y_3}(x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, y_4, y_5, y_6, y_7), \quad (3.4)$$

$$y_4 = f_{y_4}(x_{25}, x_{26}, x_{27}, x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}, x_{32}, y_8), \quad (3.5)$$

$$y_8 = f_{y_8}(x_{33}, x_{34}), \quad (3.6)$$

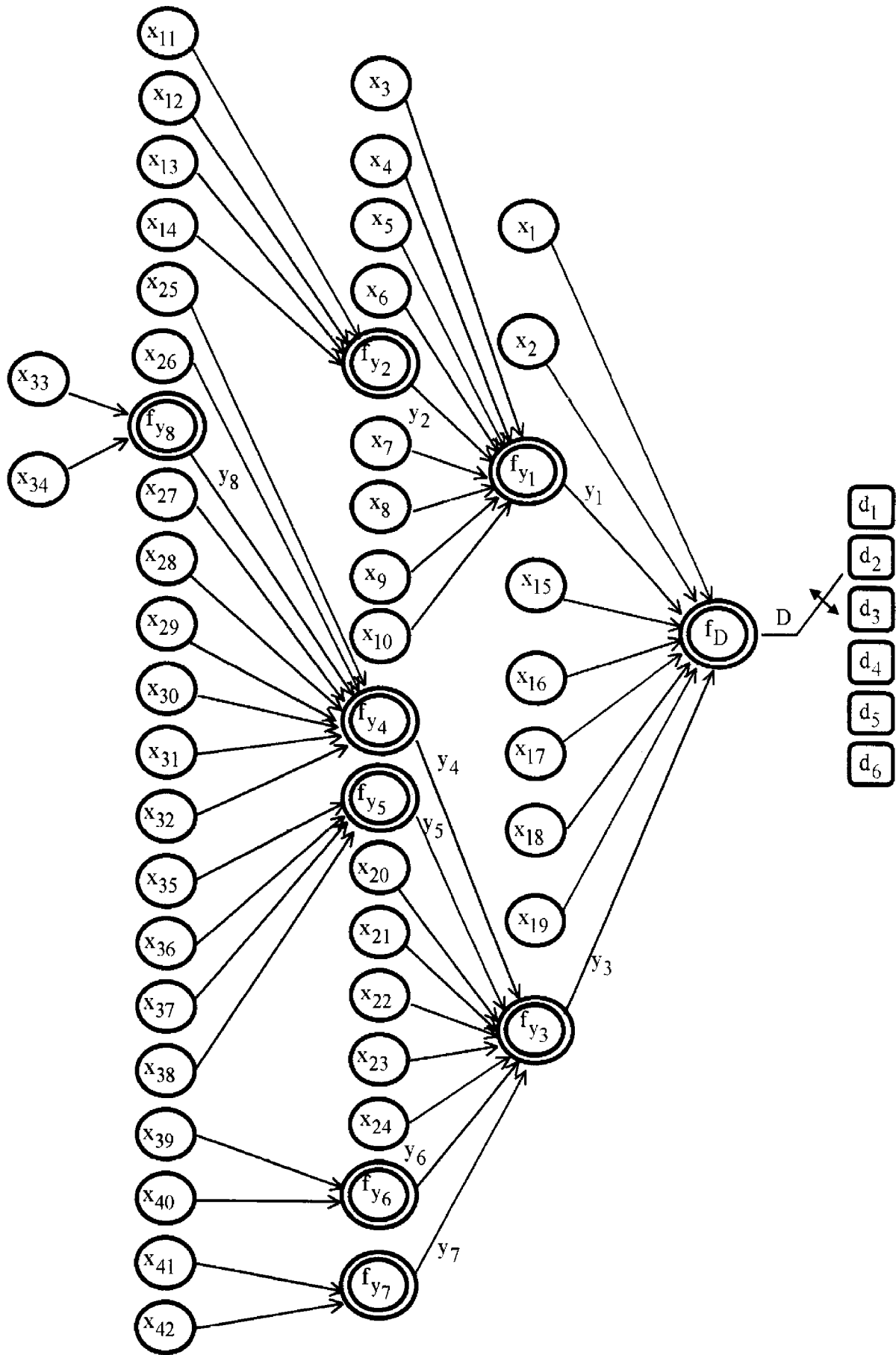


Рис. 3.1. Дерево логічного висновку для діагностування тріщини

$$y_5 = f_{y5}(x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}), \quad (3.7)$$

$$y_6 = f_{y6}(x_{39}, x_{40}), \quad (3.8)$$

$$y_7 = f_{y7}(x_{41}, x_{42}), \quad (3.9)$$

де $f(\bullet)$ – функціональний зв'язок між вхідними та вихідними змінними.
Змістовна інтерпретація частинних та укрупнених параметрів стану та обґрунтування зв'язку між запропонованими параметрами стану та причинами виникнення тріщин наведені в табл. 3.1 – 3.9.

Таблиця 3.1

Обґрунтування впливу факторів верхнього рівня ($x_1, x_2, y_1, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, y_3$) на встановлення причини появи тріщини (D)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_1 – тип конструкції	Тип конструкції підсилює або зменшує, іноді зовсім виключає певний клас причин появи тріщини. Наприклад, можливість появи тріщини від температурних деформацій у перегородках значно менша, ніж у стінах, а у стовпах – практично виключена.	[10, 52]
x_2 – умови роботи конструкції	Цей параметр змінює можливість появи тріщини від певного типу причин. Наприклад, в ненесучій конструкції можливість появи тріщини через статичне перевантаження значно менша, ніж у несучій.	[60]
y_1 – стан конструкції	Погіршення стану конструкції або неякісно виконана конструкція прискорює появу тріщини навіть при незначному прояві можливої причини тріщини (дефекту основи, неврахованому навантаженню тощо). Наприклад, якщо стан конструкції дуже послаблений, тоді навіть при незначному статичному перевантаженні (застосування більш важкого перекриття) в конструкції з'являються тріщини.	[11, 57, 60, 74]
x_{15} – місцеположення тріщини	Місцеположення тріщини один із суттєвих факторів, що впливають на визначення причини її появи. Так, якщо тріщина розташована між стінами, тоді найбільш можливими причинами є деформація основи або різна деформативність матеріалу стін. Тріщина від температурних деформацій, як правило, не знаходиться у нижній частині.	[52, 58, 74]

Продовження табл. 3.1

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{16} – вид тріщини	Цей параметр необхідно враховувати спільно з іншими при визначенні причини появи тріщини. Наприклад, горизонтальна тріщина майже не буває від температурних деформацій, рідко від статичного перевантаження та часто від особливого перевантаження.	[59]
x_{17} – напрямлення розкриття	Цей параметр суттєво впливає на встановлення причини тріщини. Наприклад, нижнє розкриття тріщини спостерігається при зосередженій осадці фундаментів; при наявності перевантаження тріщина, як правило, має верхнє розкриття.	[59]
x_{18} – ширина тріщини	Ширина тріщини опосередковано впливає на встановлення причини появи тріщини. Наприклад, тріщина від особливого перевантаження рідко буває волосяною, від температурного впливу – крупною.	[3, 33]
x_{19} – довжина тріщини	Довжина тріщини може зменшити можливість певного класу причин появи тріщин. Так, коротка тріщина (до 2-х рядів кладки) рідко є від деформації основи.	[3, 33]
u_3 – додаткова інформація	Додаткова інформація суттєво збільшує можливість появи тріщини від певного виду причин. Наприклад, відсутність вимощення, наявність води у підвалі та наявність слабких ґрунтів значно збільшують можливість появи тріщини від деформації основи; відсутність в конструкції температурного шва при його потребі збільшує можливість появи тріщини від температурних деформацій.	[59]

Таблиця 3.2

Обґрунтування впливу параметрів стану $x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, u_2$ на укрупнений параметр «Стан конструкції» (y_1)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_3 – товщина горизонтальних швів	При стовщенні горизонтальних швів об'єм розчину збільшується, що зменшує несучу спроможність конструкції. Особливо це впливає на якість конструкції, коли товщина швів перевищує 20 мм.	[10, 11]
x_4 – відхилення при заповненні швів	Незаповнення розчином швів в цегляній кладці стін призводить до перенапруги в конструкції. Крім цього неякісне заповнення швів у цегляній кладці викликає проникнення повітря при сильному вітрі, та зволоження внутрішньої поверхні стін при косому дощі. Таким чином, чим більше об'єм незаповнення швів, тим гірше стан конструкції. Навіть незначний об'єм пустот при навантаженні на стіну може сприяти появи тріщин у конструкції.	[11, 72]
x_5 – система перев'язки	Неякісна або недостатня перев'язка кладки суттєво прискорює утворення перших тріщин. Особливо небезпечно порушення системи перев'язки при навантаженнях, які викликають позацентровий стиск, згин, зріз, розтяг та місцевий стиск.	[8, 11, 24, 74]
x_6 – наявність непередбачених отворів, борозен	Через сантехнічні, електротехнічні та загально-будівельні неув'язки в цегляній кладці доводиться пробивати отвори, борозни або ніші, що значно зменшує несучу спроможність конструкції. Так, пробита горизонтальна борозна на глибину 13 см знижує міцність кладки на 50%. Особливо небезпечними є горизонтальні борозни, оскільки вони можуть послабити несучу конструкцію по всьому її поперечному перетину.	[7]
x_7 – дефекти армування	Дефекти армування значно зменшують несучу спроможність конструкції. Наприклад, при пропуску однієї сітки несуча спроможність кладки зменшується на 22%.	[10, 11]
x_8 – кривина конструкції	Кривина конструкції – одна із зовнішніх ознак деформації стіни і її послаблення. Так викривлення стіни у межах поверху на 1/3 її товщини призводить до втрати її несучої спроможності до 50%.	[56, 60]

Продовження табл. 3.2

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_9 – перевищення допустимого відхилення від вертикалі	При перевищенні допустимого відхилення від вертикалі значно зменшується, а іноді і втрачається здатність стіни нести навантаження. Наприклад, відхилення стіни від вертикалі у межах поверху до 1/6 її товщини призводить до втрати її несучої спроможності до 25%. Ослаблена таким чином конструкція є потенційним місцем появи тріщини.	[11, 17, 56]
x_{10} – зволоження кладки	При зволоженні ділянок стіни, в них виникає перенапруга, що призводить до появи мікротріщин. В свою чергу, поява тріщин призводить до ще глибшого зволоження та наступного морозного руйнування, внаслідок чого порушується стійкість стіни та втрачається її несуча спроможність.	[10, 74]
y_2 – руйнування кладки	Цей параметр значно зменшує несучу спроможність конструкції, і навіть може призвести до повної її втрати. Так вивітрювання кладки на глибину вище 50% товщини стіни призводить до повної втрати несучої спроможності конструкції. Зазначимо, що навіть незначне руйнування кладки разом з іншими дефектами кладки (викривлення, порушення системи перев'язки тощо) значно послаблюють стан конструкції.	[35, 74]

Таблиця 3.3

Обґрунтування впливу частинних параметрів стану x_{11} , x_{12} , x_{13} , x_{14} на укрупнений параметр «Руйнування кладки» (y_2)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{11} – луцення кладки	Луцення кладки найчастіше носить поверховий характер; воно зазвичай спостерігається після дії вогню на будівельну конструкцію. Цей параметр виступає як підсилювач дії інших факторів, що послаблюють стан конструкції. Однак при суттєвому луценні можливе значне зниження несучої спроможності.	[35]
x_{12} – вивітрювання кладки	При вивітрюванні кладки на глибину до 15% товщини несуча спроможність кладки знижується до 15%; на глибину до 25% – до 25%; на глибину до 40% – до 50%. Таким чином вивітрювання кладки суттєво впливає на стан конструкції.	[59, 60]

Продовження табл. 3.3

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
X ₁₃ – вилугування кладки	Порушення правил експлуатації часто призводить до впливу агресивного середовища на конструкцію, наприклад, замочування цегляної кладки агресивною до розчину швів технологічною рідиною. Деякі види цегли (силікатна, глиняна) не стійки до лугового агресивного середовища, тому відбувається руйнування конструкції та зниження її несучої спроможності.	[15, 17, 60]
X ₁₄ – викришування кладки	Викришування окремих ділянок кладки є потенційним місцем появи тріщини. Викришування цегляної кладки може бути викликане низькою якістю цегли та розчину. Суттєве викришування кладки призводить до зниження її несучої спроможності.	[60]

Таблиця 3.4

Обґрунтування впливу параметрів стану X₂₀, X₂₁, X₂₂, X₂₃, X₂₄, X₂₄, У₄, У₅, У₆, У₇ на укрупнений параметр «Додаткова інформація» (У₃)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
X ₂₀ – наслідок пожежі	Наслідки пожежі збільшують можливості появи тріщини через: 1) статичне перевантаження, оскільки при тривалій дії вогню виникають ексцентричні навантаження та послаблюється стан конструкції (при пошкодженні стін вогнем на глибину до 0,5 см знижується несуча спроможність конструкції до 15%); 2) деформацію основ, оскільки при гасінні пожежі в основу іноді в ґрунт проникає дуже багато води; 3) температурні деформації, що виникають при різкому перепаді температур.	[59, 60]
X ₂₁ – інформація про землетруси, вибухи	Землетруси та вибухи (у тому числі і віддалені) є джерелами особливих перевантажень будівлі, тому наявність інформації про них збільшує можливість появи тріщини, обумовлених саме цією причиною.	[30, 60]
X ₂₂ – наявність динамічного навантаження	При динамічних навантаженнях можливі і перевантаження, які призводять до горизонтальних та вертикальних тріщин швів кладки з рівномірним та симетричним розподілом по всій поверхні стіни. Поряд з ними виникають і нахилені тріщини, що, як правило, направлені від слабких місць стіни. Тому наявність динамічних навантажень збільшують можливість появи тріщин, обумовлених саме цією причиною.	[60]

Продовження табл. 3.4

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{23} – сколювання під перемичкою	Сколювання під перемичкою зустрічається як супутній фактор до осадової тріщин і тріщин, що обумовлені перевантаженнями. Тому наявність сколювання під перемичкою підсилює можливість появи тріщин через означені причини.	[74]
x_{24} – глибина тріщини	Глибина тріщини виступає як додатковий фактор, при виявленні причини появи тріщини. Цей показник підсилює можливість появи осадової тріщини та тріщини від перевантаження у разі, коли тріщина наскрізна (температурна тріщина, як правило, одностороння).	[35]
y_4 – можливість деформацій основи	Велике значення цього параметра збільшує можливість появи тріщини через деформації основи та дефекти фундаментів.	[14, 53]
y_5 – можливість статичного перевантаження	Велике значення цього параметра збільшує можливість появи тріщини через статичне перевантаження.	[60]
y_6 – дотримання вимог до температурного шва	Можливість появи тріщини через температурні деформації збільшується, якщо вимоги до розташування та улаштування температурних швів недотримані.	[67]
y_7 – можливість порушення технології виробництва та неврахування властивостей матеріалів	Велике значення цього параметра збільшує можливість появи тріщини через порушення технології будівельних процесів або неврахування властивостей матеріалу.	[11, 72]

Таблиця 3.5

Обґрунтування впливу параметрів стану $X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}, X_{31}, X_{32}, Y_8$ на укрупнений параметр «Можливість деформації основи» (Y_4)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
X_{25} – зсув підпірної стіни або стіни підвалу	Зсув підпірної стіни або стіни підвалу свідчить про значні деформації ґрунту, що майже завжди призводить до тріщин. Таким чином, цей параметр збільшує можливість появи тріщини через деформації основи.	[60]
X_{26} – аварії систем водо- та тепло- забезпечення, каналізації	Аварії систем каналізації, водо- та теплозабезпечення супроводжуються замочуванням будівлі. Вода проникає в ґрунт біля фундаментів, що спричиняє руйнування ґрунту або вимивання його частинок при чутливих до впливу води основ фундаментів будівлі. Це призводить до деформації основ фундаментів.	[61, 66]
X_{27} – наявність організованих водостоків, вимощення; вертикального планування	Відсутність або ушкодження даху, металевих покриттів, водостічних труб та лотків зовнішнього водовідводу призводить до зволоження конструкції та підтоплення основи будівлі. Відсутність вертикального планування будівельного майданчика та організованого поверхневого водовідводу викликає додаткове обводнення ґрунту. При цьому основа втрачає несучу спроможність. Таким чином, відсутність організованих водостоків, вимощення, вертикального планування збільшує сприяє деформаціям основи.	[49, 66, 68]
X_{28} – наявність слабких, просадочних ґрунтів, ґрунтів, що здимаються, пливунів; територій, що підробляються; неоднорідного ґрунту під спорудою	Слабкі, просадочні ґрунти, пливуні; ґрунтів, що здимаються; території, що підробляються та неоднорідність ґрунту під спорудою сприяють деформації основи. Наприклад, при розташуванні будівлі на слабких ґрунтах, як правило, фактичні деформації виявляються більше нормованих. Особливістю деформації основи споруди на слабких ґрунтах є те, що нерівномірність осадок в часі збільшується. Просадочні ґрунти у природному стані досить міцні, але при додатковому зволоженні сильно деформуються та спричиняють значні деформації споруди. Здимання ґрунтів іноді призводить до переміщення поверхні ґрунту вгору на десятки сантиметрів. Під дію здимання ґрунту підпадають не лише фундаменти мілкового закладання, але й пальові. На територіях, що підроблюються, спостерігаються зсуви ґрунту, що викликає перекося та згин споруди. Неоднорідність ґрунту викликає нерівномірність осідання будівлі.	[14, 18, 51, 53, 66]

Продовження табл. 3.5

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
X ₂₉ – наявність води у підвалі	При наявності підвалу завжди влаштовують гідроізоляцію, а при розташуванні ґрунтових вод вище відмітки підлоги підвалу влаштовують дренажі для відводу води. При недотриманні цих вимог у підвалі з'являється вода, що підвищує можливість деформації основ та фундаментів.	[15, 49]
X ₃₀ – наявність поблизу ємнісних споруд	На практиці часто спостерігаються випадки, коли будівля, що розташована поблизу ємнісної споруди, має тріщини від деформації основи. Найчастіше це відбувається через просочування рідини із ємнісних споруд (протікання, аварії) у ґрунт, що призводить до зміни його властивостей.	[66]
X ₃₁ – наявність поблизу об'єктів, що будуються (вже прибудовані), або знос будівлі, що впритул примикає до існуючої	При прибудові впритул нової будівлі до існуючої тиск від конструкцій нової будівлі ущільнює ґрунт основи та призводить до збільшення стиснутої зони, що викликає нахил фундаменту існуючої будівлі. Будівлі, що примикають одна до одної є одним цілим, тобто є своєрідним контрфорсом. Якщо розбирається одна з них, то в будівлі, що залишається, виникають просадки. Таким чином, наявність поблизу об'єктів, що прибудовуються (або вже прибудовані), або знос будівлі, що впритул примикає до існуючої, викликає деформації основи, внаслідок чого з'являються тріщини.	[15, 61]
X ₃₂ – зміщення балок, перемичок при експлуатації	Зміщення балок, перемичок в процесі експлуатації найчастіше відбувається із-за деформації основ (фундаменту). Цей показник є додатковим до основних – відсутність вимощення та наявність просадочних ґрунтів.	[35]
У ₈ – дотримання вимог до осадового шва	Недотримання вимог до розташування та улаштування осадового шва значно збільшує можливість появи тріщини через деформації основи.	[49, 67]

Таблиця 3.6

Обґрунтування впливу частинних параметрів стану x_{33} та x_{34} на укрупнений параметр «Дотримання вимог до осадкового шва» (y_8)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{33} – необхідність осадкового шва	Осадковий шов потрібен коли прогнозується нерівномірна осадка основи будівлі через неоднакову щільність ґрунтів, різну поверховість будівлі тощо.	[67]
x_{34} – наявність осадкового шва	Відсутність осадкового шва (при потребі у ньому) або неякісний осадковий шов майже завжди призводять до появи тріщин через нерівномірну осадку будівлі.	[33]

Таблиця 3.7

Обґрунтування впливу частинних параметрів стану $x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}$ на укрупнений параметр «Можливість статичного перевантаження» (y_5)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{35} – невраховані в проекті навантаження	Надбудова з застосуванням більш важкого перекриття, улаштування обладнання, важчого за проектне, заміна або перебудова стін тощо сприяє статичному перевантаженню та появі тріщин.	[7, 60]
x_{36} – наявність механічних ушкоджень, що зменшують розрахунковий переріз	При зменшенні перерізу конструкції знижується її несуча спроможність. Таким чином наявність механічних ушкоджень, що зменшують розрахунковий переріз, є один із факторів, які викликають статичне перевантаження конструкції.	[80]
x_{37} – обпирання балок та прогонів перекриття без необхідних конструктивних заходів	Обпирання балок та прогонів перекриття на цегляні стіни без необхідних конструктивних заходів підвищує можливість статичного перевантаження через появу місцевого перевантаження. Великий місцевий тиск на стіну виникає від залізобетонного або сталевих прогонів, в місці обпирання якого не покладено розподільчий горизонтальний елемент. При такому обпиранні часто з'являються вертикальні або нахилені тріщини.	[11]
x_{38} – недостатня величина обпирання балок і плит	Цей дефект призводить до ексцентричного навантаження на стіну та зниження несучої спроможності конструкції, що сприяє статичному перевантаженню. Наприклад, при зміщенні плит перекриття на опорах більш ніж на 1/5 глибини защемлення в стіні несуча спроможність конструкції знижується до 50%.	[59]

Таблиця 3.8

Обґрунтування впливу частинних параметрів стану x_{39} та x_{40} на укрупнений параметр «Дотримання вимог до температурного шва» (y_6)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{39} – необхідність температурного шва	Потреба у температурному шві виникає при прогнозованих небезпечних температурних деформаціях конструкції, особливо в місцях стиків зовнішніх стін з поперечними внутрішніми стінами.	[10, 67]
x_{40} – наявність температурного шва	Відсутність температурного шва або неякісно виконаний шов, при потребі у ньому, означають недотримання вимог до температурного шва. В цих випадках часто з'являються тріщин через перепади температур.	[11]

Таблиця 3.9

Обґрунтування впливу частинних параметрів стану x_{41} та x_{42} на укрупнений параметр «Можливість порушення технології виробництва та неврахування властивостей матеріалів» (y_7)

Параметр стану	Приклади взаємозв'язку	Джерело
x_{41} – виконання робіт в зимовий період	Виконання робіт в зимово-весняний період вимагає чіткого дотримання вимог технології виробництва робіт. Саме в цей період спостерігається найбільше порушень технології виробництва будівельних робіт.	[11, 66, 68]
x_{42} - застосування різноматеріалів, та матеріалу не за призначенням	Застосування різноматеріалів в єдиній конструкції, наприклад, силікатної та клінкерної цегл, потребує виконання низки спеціальних умов. Практичний досвід свідчить, що в будівельно-монтажних роботах, пов'язаних з використанням різноматеріалів, часто допускаються порушення.	[60]

3.3. Формалізація параметрів стану лінгвістичними змінними

Формалізація частинних та укрупнених параметрів стану у вигляді лінгвістичних змінних наведена в табл. 3.10 – 3.11. Для представлення термів в формі нечітких множин будемо використовувати дзвіноподібну функцію належності (див. табл. 2.1). Експертно обрані параметри функцій належності термів змінних $x_1 \dots x_{42}$ наведені в додатку А.

Таблиця 3.10

Формалізація частинних параметрів стану лінгвістичними змінними

Частинний параметр стану	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки
x_1 – тип конструкції	[0, 1] у. о.	стіна глуха (сг); стіна з пілястром (п); простінок, стовп (пр); перегородка глуха (пг); перегородка з прорізом (пп); стіна з прорізом (сп)
x_2 – умови роботи конструкції	[0, 1] у. о.	ненесуча (нн); самонесуча (сн); несуча (н)
x_3 – товщина горизонтальних швів	[10, 30] мм	нормальна (н); перевищена (п); значно перевищена (зп)
x_4 – відхилення при заповненні швів	[0, 1] у. о.	немає (н); мало (м); багато (б)
x_5 – система перев'язки	[0, 1] у. о.	непорушена (нп); порушена (п)
x_6 – наявність непередбачених отворів, борозен	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x_7 – дефекти армування	[0, 1] у. о.	немає (н); незначні (нз); суттєві (с)
x_8 – кривина конструкції	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x_9 – перевищення допустимого відхилення від вертикалі	[0, 200] %	немає (н); незначне (нз); суттєве (с)
x_{10} – зволоження кладки	[0, 1] у. о.	немає (н); незначне (нз); суттєве (с)
x_{11} – лушення кладки	[0, 1] у. о.	немає (н); незначне (нз); суттєве (с)
x_{12} – вивітрювання кладки	[0, 1] у. о.	немає (н); незначне (нз); суттєве (с)
x_{13} – вилуговування кладки	[0, 1] у. о.	немає (н); незначне (нз); суттєве (с)
x_{14} – викришування кладки	[0, 1] у. о.	немає (н); незначне (нз); суттєве (с)
x_{15} – місцеположення тріщини	[0, 1] у. о.	через всю конструкцію (чв); між стінами (мс); у місцях примикання (мп); від монолітного включення (мв); на опорах (оп); у верхній частині конструкції (вч); на вільному полі (вв); у нижній частині конструкції (нч)
x_{16} – вид тріщини	[90, 0] градусів	вертикальна (в); коса (к); горизонтальна (г)
x_{17} – направлення розкриття	[0, 1] у. о.	верхнє (вр); рівномірне (рр); нижнє (нр)
x_{18} – ширина тріщини	[0, 40] мм	волосна (вол); дрібна (др); розвинута (роз); велика (вел); крупна (кр)
x_{19} – довжина тріщини	[0.1, 2] м.	коротка (к); середня (сд); довга (д); дуже довга (дд)

Продовження табл. 3.10

Частинний параметр стану	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки
x ₂₀ – наслідок пожежі	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₂₁ – інформація про землетруси, вибухи	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₂₂ – наявність динамічного навантаження	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₂₃ – сколювання під перемичкою	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₂₄ – глибина тріщини	[0, 1] у. о.	одностороння (од); наскрізна (нс)
x ₂₅ – зсув підпірної стіни, або стіни підвалу	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₂₆ – аварії систем водота тепло- забезпечення	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₂₇ – наявність організованих водостоків, вимощення, вертикального планування	[0, 1] у. о.	є (є); немає (н)
x ₂₈ – наявність слабких, просадочних ґрунтів, ґрунтів, що здимаються, територій, що підроблюються; неоднорідності ґрунту	[0, 1] у. о.	немає (н); невідомо (нв); є (є)
x ₂₉ – наявність води у підвалі	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₃₀ – наявність поблизу ємнісних споруд	[0, 1] у. о.	немає (н); невідомо (нв); є (є)
x ₃₁ – наявність поблизу об'єктів, що будуються (вже прибудовані), або знос будівлі, що впритул примикає до існуючою	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₃₂ – зміщення балок, перемичок при експлуатації	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
x ₃₃ – необхідність осадового шва	[0, 1] у. о.	непотрібний (нп); потрібний (п)
x ₃₄ – наявність осадового шва	[0, 1] у. о.	немає (н); є неякісний (єн); є (є)
x ₃₅ – невраховані в проекті навантаження	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)

Продовження табл. 3.10

Частинний параметр стану	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки
X ₃₆ – наявність механічних ушкоджень, що зменшують розрахунковий переріз	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
X ₃₇ – обпирання балок та прогонів перекриття без необхідних конструктивних заходів	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
X ₃₈ – недостатня величина обпирання балок і плит	[0, 1] у. о.	немає (н); є (є)
X ₃₉ – необхідність температурного шва	[0, 1] у. о.	непотрібний (нп); потрібний (п)
X ₄₀ – наявність температурного шва	[0, 1] у. о.	немає (н); є неякісний (єн); є (є)
X ₄₁ – виконання робіт в зимовий період	[0, 1] у. о.	немає (н); невідомо (нв); є (є)
X ₄₂ – застосування різнорідних матеріалів, та матеріалу не за призначенням	[0, 1] у. о.	немає (н); невідомо (нв); є (є)

Таблиця 3.11

Формалізація укрупнених параметрів стану лінгвістичними змінними

Укрупнений параметр стану	Терми для лінгвістичної оцінки
Y ₁ – стан конструкції	нормальний (н); послаблений (п); дуже послаблений (дп)
Y ₂ – руйнування кладки	без пошкоджень (бп); пошкоджена (п); дуже пошкоджена (дп)
Y ₃ – додаткова інформація	відсутня (від); перевантаження статичне (пс); перевантаження динамічне (пд); особливе перевантаження (по); дефекти основи та фундаментів (оф); температурний вплив (т); неврахування властивостей матеріалу або порушення технології виробництва робіт (вм)
Y ₄ – можливість деформації основи	відсутня (в); мала (м); значна (зн)
Y ₅ – можливість статичного перевантаження	немає (н); є (є)

Продовження табл. 3.11

Укрупнений параметр стану	Терми для лінгвістичної оцінки
у ₆ – дотримання вимог до температурного шва	вимоги дотримані (д); вимоги не дотримані (нд)
у ₇ – можливість порушення технології виробництва та неврахування властивостей матеріалів	немає (н); є (є)
у ₈ – дотримання вимог до осадового шва	вимоги дотримані (д); вимоги не дотримані (нд)

3.4. Нечіткі бази знань з діагностування тріщин

Нечіткі бази знань, що відповідають співвідношенням (3.1) – (3.9), наведені в табл. 3.12 – 3.20. Кожний рядок цих таблиць відповідає одному правилу типу <Якщо – тоді>. Зв'язок між лінгвістичними змінними всередині одного правила здійснюється з залученням логічної операції ТА. В межах однієї бази знань лінгвістичні правила-рядки пов'язані логічною операцією АБО. В нечітких базах знань знаком « \leftarrow » позначенні змінні, що можуть приймати довільні значення без порушення істинності відповідного правила. Загальна кількість правил в запропонованих базах знань дорівнює 151. Вагові коефіцієнти всіх правил прийняті рівними одиниці. Оптимальні значення вагових коефіцієнтів будуть знайдені при навчанні нечіткої моделі.

При формуванні правил нечіткої бази знань про причину появи тріщини (табл. 3.13) використовувалася інформація з [37, 58, 72]; нечіткої бази знань про стан конструкції (табл. 3.14) – з [7, 8, 10, 11, 15, 56, 60, 72, 74]; нечіткої бази знань про руйнування кладки (табл. 3.15) – з [35, 60, 74]; нечіткої бази знань про можливість деформації основи (табл. 3.17) – з [50, 58, 61, 72]. Крім зазначених джерел при формуванні баз знань використовувалися знання експертів ЗАТ "Вінницький проектний інститут" (керівник експертної групи – В.Г. Титаренко).

Таблиця 3.12

База знань про співвідношення (3.1)

№№	x ₁	x ₂	y ₁	x ₁₅	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	x ₁₉	y ₃	D
1	п	н	п	оп	к	вр	вол	-	від	d ₁
2	-	-	дп	чв	к	-	-	-	пс	d ₁
3	-	н	дп	оп	в	вр	-	-	від	d ₁
4	-	-	-	вч	к	вр	-	-	пс	d ₁
5	-	н	дп	вп	в	рр	др	-	пс	d ₁
6	-	нн	-	мп	в	вр	вол	-	пс	d ₁
7	пр	н	н	вч	в	вр	вол	д	пс	d ₁
8	-	н	-	оп	-	вр	-	-	пс	d ₁
9	-	-	-	мп	в	вр	вол	-	пд	d ₂
10	сп	н	п	чв	к	рр	вол	дд	пд	d ₂
11	-	-	-	вп	в	вр	др	-	пд	d ₂
12	-	-	-	вч	к	вр	др	-	пд	d ₂
13	-	н	-	оп	в	вр	-	-	пд	d ₂
14	-	-	-	мс	в	вр	-	-	пд	d ₂
15	сг	н	-	мс	к	вр	-	-	по	d ₃
16	-	н	-	оп	в	вр	роз	д	по	d ₃
17	-	-	-	вп	-	-	-	-	по	d ₃
18		н	п	-	в	вр	вол	к	по	d ₃
19	-	-	дп	чв	к	-	-	-	оф	d ₄
20	-	н	-	-	-	вр	-	-	оф	d ₄
21	-	н	-	-	-	нр	-	-	оф	d ₄
22	сп	н	-	чв	в	вр	кр	дд	від	d ₄
23	-	н	дп	чв	к	-	вел	дд	від	d ₄
24	сп	н	п	чв	к	нр	вел	-	від	d ₄
25	-	сн	п	мс	в	вр	вол	-	від	d ₄
26	сп	сн	п	мс	к	нр	-	-	оф	d ₄
27	-	н	н	чв	в	-	кр	дд	оф	d ₄
28	сг	н	-	нч	в	нр	вел	-	оф	d ₄
29	сп	н	н	вп	к	-	-	-	оф	d ₄
30	сп	н	-	нч	в	-	-	д	оф	d ₄
31	сп	-	п	нч	к	-	-	-	оф	d ₄
32	пр	н	п	нч	-	нр	роз	д	оф	d ₄

Продовження табл. 3.12

№№	x ₁	x ₂	y ₁	x ₁₅	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	x ₁₉	y ₃	D
33	пр	н	-	вп	-	-	др	-	оф	d ₄
34	пг	нн	п	мп	г	рр	роз	дд	оф	d ₄
35	пп	нн	н	вч	к	-	-	сд	оф	d ₄
36	сп	н	-	вч	в	вр	др	сд	оф	d ₄
37	сг	н	дп	мс	в	вр	роз	-	оф	d ₄
38	сп	н	-	вп	к	вр	-	-	оф	d ₄
39	-	-	-	вп	в	вр	-	-	оф	d ₄
40	-	н	-	вч	в	вр	-	-	т	d ₅
41	сп	сн	-	вп	к	рр	вол	-	т	d ₅
42	-	сн	н	вч	к	вр	др	д	т	d ₅
43	пр	-	-	вп	в	рр	вол	-	т	d ₅
44	пр	сн	н	вп	в	рр	др	-	т	d ₅
45	пр	н	-	мв	к	вр	вол	сд	вм	d ₆
46	сп	сн	дп	мс	в	рр	вол	-	вм	d ₆
47	пп	нн	дп	вч	к	вр	др	сд	вм	d ₆
48	-	сн	дп	чв	к	-	-	-	вм	d ₆
49	-	-	п	мв	в	-	др	-	вм	d ₆

Таблиця 3.13

База знань про співвідношення (3.2)

№№	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	y ₂	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	y ₁
50	н	н	нп	н	бп	н	н	н	н	н
51	н	м	нп	н	бп	н	н	н	н	н
52	н	м	нп	н	бп	н	н	нз	н	п
53	п	м	нп	н	бп	н	н	н	н	п
54	п	м	нп	є	бп	н	н	н	нз	п
55	н	м	нп	н	п	н	н	н	нз	п
56	н	м	нп	н	п	н	н	н	н	п
57	н	н	п	н	бп	н	н	н	н	п
58	зп	н	нп	н	бп	н	н	н	н	п
59	н	м	нп	н	бп	н	є	н	н	п
60	п	б	нп	н	бп	н	н	нз	н	п
61	н	н	нп	н	бп	нз	н	н	н	п
62	п	н	нп	н	п	н	н	н	н	п
63	н	м	нп	н	п	н	н	нз	н	п
64	зп	м	нп	н	п	н	н	н	н	п

Продовження табл. 3.13

№№	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	У ₂	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	У ₁
65	н	н	нп	н	бп	н	н	н	с	п
66	зп	-	п	є	-	-	-	-	-	дп
67	-	б	-	-	-	нз	є	нз	-	дп
68	-	-	-	-	дп	-	-	-	-	дп
69	-	-	п	-	-	-	-	с	с	дп
70	зп	б	п	-	-	с	є	-	-	дп
71	-	-	-	є	п	с	-	-	с	дп
72	-	б	п	-	п	с	є	-	-	дп
73	п	-	п	є	бп	с	є	-	с	дп
74	зп	м	п	є	бп	нз	є	с	-	дп
75	п	м	п	є	п	нз	є	-	-	дп
76	зп	б	-	є	-	с	є	-	-	дп
77	п	б	п	-	-	с	є	-	с	дп
78	зп	б	п	є	-	с	н	нз	нз	дп
79	зп	б	п	є	дп	с	є	с	с	дп
80	зп	б	п	є	-	нз	н	с	-	дп

Таблиця 3.14

База знань про співвідношення (3.3)

№№	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	У ₂
81	нз	н	н	н	бп
82	н	н	н	н	бп
83	н	нз	н	н	п
84	нз	н	нз	н	п
85	нз	н	н	нз	п
86	с	н	н	н	п
87	н	н	н	нз	п
88	с	с	с	с	дп
89	-	с	-	-	дп
90	-	-	с	-	дп
91	-	-	-	с	дп
92	нз	нз	нз	нз	дп
93	с	нз	-	нз	дп
94	с	нз	нз	-	дп
95	с	-	нз	нз	дп

Таблиця 3.15

База знань про співвідношення (3.4)

№№	У ₄	У ₅	Х ₂₀	Х ₂₁	Х ₂₂	Х ₂₃	Х ₂₄	У ₆	У ₇	У ₃
96	В	Н	Н	Н	Н	Н	ОД	Д	Н	ВІД
97	-	Є	-	-	-	-	-	-	-	ПС
98	В	Є	Є	Н	Н	Є	-	Д	Н	ПС
99	В	Н	Н	Н	Є	Є	НС	Д	Н	ПД
100	-	-	-	-	Є	-	-	-	-	ПД
101	-	-	-	Є	-	-	-	-	-	ПО
102	В	Н	Н	Є	Н	Є	НС	Д	Н	ПО
103	З	-	-	-	-	-	-	-	-	оф
104	З	Н	Є	Н	Н	Є	НС	Д	Н	оф
105	М	Н	Є	Н	Н	Є	НС	Д	Н	оф
106	М	-	Є	-	-	-	-	-	-	оф
107	М	-	-	-	-	Є	-	-	-	оф
108	-	-	-	-	-	-	-	НД	-	Т
109	В	Н	Н	Н	Н	Н	ОД	НД	Н	Т
110	-	-	-	-	-	-	-	-	Є	ВМ
111	В	Н	Н	Н	Н	Н	ОД	Д	Є	ВМ

Таблиця 3.16

База знань про співвідношення (3.5)

№№	Х ₂₅	Х ₂₆	У ₈	Х ₂₇	Х ₂₈	Х ₂₉	Х ₃₀	Х ₃₁	Х ₃₂	У ₄
112	Н	Н	Л	Є	Н	Н	Н	Н	Н	В
113	Н	Н	Д	Є	Н	Н	НВ	Н	Н	В
114	Н	Н	Л	Є	Н	Н	Є	Н	Н	М
115	Н	Н	Д	Є	Н	Н	Н	Н	Є	М
116	Н	Н	Д	Є	НВ	Н	-	Н	Н	М
117	Є	Є	НЛ	Н	Є	Є	Є	Є	Є	З
118	Є	-	-	-	-	-	-	-	-	З
119	-	Є	-	-	-	-	-	-	-	З
120	-	-	НД	-	-	-	-	-	-	З
121	-	-	-	Н	-	-	-	-	-	З
122	-	-	-	-	Є	Є	-	-	-	З
123	-	-	-	-	Є	-	-	-	Є	З
124	-	-	-	-	Є	-	Є	-	-	З
125	-	-	-	-	Є	-	НВ	-	-	З
126	-	-	-	-	Є	-	-	Є	-	З
127	-	-	-	-	НВ	Є	-	-	-	З
128	-	-	-	-	НВ	-	-	Є	-	З
129	-	-	-	-	НВ	-	-	-	Є	З
130	-	-	-	-	-	Є	Є	-	Є	З
131	-	-	-	-	-	-	-	Є	Є	З

Таблиця 3.17

База знань про співвідношення (3.6)

№№	X ₃₃	X ₃₄	У ₈
132	п	є	л
133	нп	-	л
134	п	н	нл
135	п	єн	нл

Таблиця 3.18

База знань про співвідношення (3.7)

№№	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₇	X ₃₈	У ₅
136	н	н	н	н	н
137	є	-	-	-	є
138	-	є	-	-	є
139	-	-	є	-	є
140	-	-	-	є	є
141	є	є	є	є	є

Таблиця 3.19

База знань про співвідношення (3.8)

№№	X ₃₉	X ₄₀	У ₆
142	п	є	л
143	нп	-	л
144	п	н	нл
145	п	єн	нл

Таблиця 3.20

База знань про співвідношення (3.9)

№№	X ₄₁	X ₄₂	У ₇
146	є	-	є
147	-	є	є
148	є	є	є
149	н	н	н
150	нв	н	н
151	н	нв	н

3.5. Нечітка модель діагностування тріщин цегляних конструкцій

Математичною моделлю діагностування є система нечітких логічних рівнянь в формі (2.2). Перед формуванням системи нечітких логічних

рівнянь для діагностування тріщин цегляних конструкцій будівель необхідно врахувати такі особливості баз знань (табл. 3.12 – 3.20), як наявність правил у «неповному форматі» та рівність одиниці вагових коефіцієнтів усіх правил. В неповних правилах довільне значення відповідних змінних не змінює істинності правил, тому вилучимо функції належностей цих змінних з логічних рівнянь. Значення вагових коефіцієнтів усіх правил дорівнює одиниці, тому для зручності вагові коефіцієнти можна вилучити з усіх логічних рівнянь.

По базі знань з табл. 3.12 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення причин появи тріщин, що відповідає співвідношенню (3.1). Для компактності запису операція " ^ " позначена (·):

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(D) = & \mu^{\Pi}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{\Pi}(y_1) \cdot \mu^{OP}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{VOL}(x_{18}) \cdot \mu^{VID}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{DP}(y_1) \cdot \mu^{CH}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{15}) \cdot \mu^{PC}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{DP}(y_1) \cdot \mu^{OP}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{VID}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{BCH}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{PC}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{DP}(y_1) \cdot \mu^{BP}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{PP}(x_{17}) \cdot \mu^{DP}(x_{18}) \cdot \mu^{PC}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{HH}(x_2) \cdot \mu^{MP}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{VOL}(x_{18}) \cdot \mu^{PC}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{PP}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(y_1) \cdot \mu^{BCH}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{VOL}(x_{18}) \cdot \mu^D(x_{19}) \cdot \mu^{PC}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{OP}(x_{15}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{PC}(y_3); \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(D) = & \mu^{MP}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{VOL}(x_{18}) \cdot \mu^{PD}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{CP}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{\Pi}(y_1) \cdot \mu^{CH}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{PP}(x_{17}) \cdot \mu^{VOL}(x_{18}) \cdot \mu^{DD}(x_{19}) \cdot \mu^{PD}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{BP}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{DP}(x_{18}) \cdot \mu^{PD}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{BCH}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{DP}(x_{18}) \cdot \mu^{PD}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{OP}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{PD}(y_3) \vee \\ & \vee \mu^{MC}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{BP}(x_{17}) \cdot \mu^{PD}(y_3); \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_3}(D) &= \mu^{сг}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{mc}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{bp}(x_{17}) \cdot \mu^{по}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{оп}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{bp}(x_{17}) \cdot \mu^{роз}(x_{18}) \cdot \mu^L(x_{19}) \cdot \mu^{по}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{вп}(x_{15}) \cdot \mu^{по}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^П(x_3) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{bp}(x_{17}) \cdot \mu^{вол}(x_{18}) \cdot \mu^K(x_{19}) \cdot \mu^{по}(y_3); \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_4}(D) &= \mu^{дп}(y_1) \cdot \mu^{чв}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{bp}(x_{17}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{hp}(x_{17}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сп}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{чв}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{bp}(x_{17}) \cdot \mu^{кр}(x_{18}) \cdot \mu^{дд}(x_{19}) \cdot \mu^{від}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^{дп}(y_1) \cdot \mu^{чв}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{вел}(x_{18}) \cdot \mu^{дд}(x_{19}) \cdot \mu^{від}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сп}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^П(y_1) \cdot \mu^{чв}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{hp}(x_{17}) \cdot \mu^{вел}(x_{18}) \cdot \mu^{від}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сч}(x_2) \cdot \mu^П(y_1) \cdot \mu^{mc}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{bp}(x_{17}) \cdot \mu^{вол}(x_{18}) \cdot \mu^{від}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сп}(x_1) \cdot \mu^{сч}(x_2) \cdot \mu^П(y_1) \cdot \mu^{mc}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{hp}(x_{17}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(y_1) \cdot \mu^{чв}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{кр}(x_{18}) \cdot \mu^{дд}(x_{19}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сг}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{нч}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^{hp}(x_{17}) \cdot \mu^{вел}(x_{18}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сп}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(y_1) \cdot \mu^{вп}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сп}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{нч}(x_{15}) \cdot \mu^B(x_{16}) \cdot \mu^L(x_{19}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{сп}(x_1) \cdot \mu^П(y_1) \cdot \mu^{нч}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{пр}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^П(y_1) \cdot \mu^{нч}(x_{15}) \cdot \mu^{hp}(x_{17}) \cdot \mu^{роз}(x_{18}) \cdot \mu^L(x_{19}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{пр}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{вп}(x_{15}) \cdot \mu^{др}(x_{18}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{пг}(x_1) \cdot \mu^{нн}(x_2) \cdot \mu^П(y_1) \cdot \mu^{мп}(x_{15}) \cdot \mu^Г(x_{16}) \cdot \mu^{пр}(x_{17}) \cdot \mu^{роз}(x_{18}) \cdot \mu^{дд}(x_{19}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \\ &\vee \mu^{пп}(x_1) \cdot \mu^{нн}(x_2) \cdot \mu^H(y_1) \cdot \mu^{вч}(x_{15}) \cdot \mu^K(x_{16}) \cdot \mu^{сд}(x_{19}) \cdot \mu^{оф}(y_3) \vee \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \vee \mu^{\text{СП}}(x_1) \cdot \mu^{\text{H}}(x_2) \cdot \mu^{\text{БЧ}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ДР}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{СД}}(x_{19}) \cdot \mu^{\text{ОФ}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{СГ}}(x_1) \cdot \mu^{\text{H}}(x_2) \cdot \mu^{\text{ДП}}(y_1) \cdot \mu^{\text{МС}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{РОЗ}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{ОФ}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{СП}}(x_1) \cdot \mu^{\text{H}}(x_2) \cdot \mu^{\text{БП}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{K}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ОФ}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{БП}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ОФ}}(y_3); \tag{3.13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{d}_5}(\text{D}) = & \mu^{\text{H}}(x_2) \cdot \mu^{\text{БЧ}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{T}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{СП}}(x_1) \cdot \mu^{\text{СН}}(x_2) \cdot \mu^{\text{БП}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{K}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{PP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ВОЛ}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{T}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{СН}}(x_2) \cdot \mu^{\text{H}}(y_1) \cdot \mu^{\text{БЧ}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{K}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ДР}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{Д}}(x_{19}) \cdot \mu^{\text{T}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{PP}}(x_1) \cdot \mu^{\text{БП}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{PP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ВОЛ}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{T}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{PP}}(x_1) \cdot \mu^{\text{СН}}(x_2) \cdot \mu^{\text{H}}(y_1) \cdot \mu^{\text{БП}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{PP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ДР}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{T}}(y_3); \tag{3.14}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{d}_6}(\text{D}) = & \mu^{\text{PP}}(x_1) \cdot \mu^{\text{H}}(x_2) \cdot \mu^{\text{MB}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{K}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ВОЛ}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{СД}}(x_{19}) \cdot \mu^{\text{BM}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{СП}}(x_1) \cdot \mu^{\text{СН}}(x_2) \cdot \mu^{\text{ДП}}(y_1) \cdot \mu^{\text{МС}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{PP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ВОЛ}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{BM}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{ПП}}(x_1) \cdot \mu^{\text{HH}}(x_2) \cdot \mu^{\text{ДП}}(y_1) \cdot \mu^{\text{БЧ}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{K}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BP}}(x_{17}) \cdot \mu^{\text{ДР}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{СД}}(x_{19}) \cdot \mu^{\text{BM}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{СН}}(x_2) \cdot \mu^{\text{ДП}}(y_1) \cdot \mu^{\text{ЧБ}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{K}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{BM}}(y_3) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{П}}(y_1) \cdot \mu^{\text{MB}}(x_{15}) \cdot \mu^{\text{B}}(x_{16}) \cdot \mu^{\text{ДР}}(x_{18}) \cdot \mu^{\text{BM}}(y_3). \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

По базі знань з табл. 3.13 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення стану конструкції, що відповідає співвідношенню (3.2):

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{H}}(y_1) = & \mu^{\text{H}}(x_3) \cdot \mu^{\text{H}}(x_4) \cdot \mu^{\text{НП}}(x_5) \cdot \mu^{\text{H}}(x_6) \cdot \mu^{\text{БП}}(y_2) \cdot \mu^{\text{H}}(x_7) \cdot \mu^{\text{H}}(x_8) \cdot \mu^{\text{H}}(x_9) \cdot \mu^{\text{H}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{H}}(x_3) \cdot \mu^{\text{M}}(x_4) \cdot \mu^{\text{НП}}(x_5) \cdot \mu^{\text{H}}(x_6) \cdot \mu^{\text{БП}}(y_2) \cdot \mu^{\text{H}}(x_7) \cdot \mu^{\text{H}}(x_8) \cdot \mu^{\text{H}}(x_9) \cdot \mu^{\text{H}}(x_{10}); \tag{3.16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{П}}(y_1) = & \mu^{\text{H}}(x_3) \cdot \mu^{\text{M}}(x_4) \cdot \mu^{\text{НП}}(x_5) \cdot \mu^{\text{H}}(x_6) \cdot \mu^{\text{БП}}(y_2) \cdot \mu^{\text{H}}(x_7) \cdot \mu^{\text{H}}(x_8) \cdot \mu^{\text{H}^3}(x_9) \cdot \mu^{\text{H}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{П}}(x_3) \cdot \mu^{\text{M}}(x_4) \cdot \mu^{\text{НП}}(x_5) \cdot \mu^{\text{H}}(x_6) \cdot \mu^{\text{БП}}(y_2) \cdot \mu^{\text{H}}(x_7) \cdot \mu^{\text{H}}(x_8) \cdot \mu^{\text{H}}(x_9) \cdot \mu^{\text{H}}(x_{10}) \vee
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \vee \mu^{\Pi}(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{3II}}(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\Pi}(x_3) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\Pi}(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{3II}}(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{\text{HII}}(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^{\epsilon}(x_{10}); (3.17)
 \end{aligned}$$

$$\mu^{\text{дII}}(y_1) = \mu^{\text{3II}}(x_3) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_6) \vee$$

$$\begin{aligned}
 & \vee \mu^{\bar{\text{II}}}(x_4) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_9) \vee \mu^{\text{дII}}(y_2) \vee \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_9) \cdot \mu^{\epsilon}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{3II}}(x_3) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(x_4) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \vee \mu^{\epsilon}(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^{\epsilon}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \vee \\
 & \vee \mu^{\bar{\text{II}}}(x_4) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^{\epsilon}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \vee \\
 & \vee \mu^{\Pi}(x_3) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^{\epsilon}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \cdot \mu^{\epsilon}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{3II}}(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_6) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(y_2) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \cdot \mu^{\epsilon}(x_9) \vee \\
 & \vee \mu^{\Pi}(x_3) \cdot \mu^M(x_4) \cdot \mu^{\Pi}(x_5) \cdot \mu^{\epsilon}(x_6) \cdot \mu^{\Pi}(y_2) \cdot \mu^{\text{H3}}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{3II}}(x_3) \cdot \mu^{\bar{\text{II}}}(x_4) \cdot \mu^{\epsilon}(x_6) \cdot \mu^{\epsilon}(x_7) \cdot \mu^{\epsilon}(x_8) \vee
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \vee \mu^{\text{п}}(x_3) \cdot \mu^{\text{б}}(x_4) \cdot \mu^{\text{п}}(x_5) \cdot \mu^{\text{с}}(x_7) \cdot \mu^{\text{с}}(x_8) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{зп}}(x_3) \cdot \mu^{\text{б}}(x_4) \cdot \mu^{\text{п}}(x_5) \cdot \mu^{\text{с}}(x_6) \cdot \mu^{\text{с}}(x_7) \cdot \mu^{\text{н}}(x_8) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_9) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{зп}}(x_3) \cdot \mu^{\text{б}}(x_4) \cdot \mu^{\text{п}}(x_5) \cdot \mu^{\text{с}}(x_6) \cdot \mu^{\text{дп}}(y_2) \cdot \mu^{\text{с}}(x_7) \cdot \mu^{\text{с}}(x_8) \cdot \mu^{\text{с}}(x_9) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{10}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{зп}}(x_3) \cdot \mu^{\text{б}}(x_4) \cdot \mu^{\text{п}}(x_5) \cdot \mu^{\text{с}}(x_6) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_7) \cdot \mu^{\text{н}}(x_8) \cdot \mu^{\text{с}}(x_9). \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

По базі знань з табл. 3.14 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення рівня руйнування кладки, що відповідає співвідношенню (3.3):

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{бп}}(y_2) &= \mu^{\text{нз}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{14}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{н}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{14}); \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{п}}(y_2) &= \mu^{\text{н}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{14}) \vee \mu^{\text{нз}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{14}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{нз}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{14}) \vee \mu^{\text{с}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{14}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{н}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{14}); \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{дп}}(y_2) &= \mu^{\text{с}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{14}) \vee \mu^{\text{с}}(x_{12}) \vee \mu^{\text{с}}(x_{13}) \vee \mu^{\text{с}}(x_{14}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{нз}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{14}) \vee \mu^{\text{с}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{14}) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{с}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{12}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{13}) \vee \mu^{\text{с}}(x_{11}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{13}) \cdot \mu^{\text{нз}}(x_{14}). \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

По базі знань з табл. 3.15 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення додаткової інформації, що відповідає співвідношенню (3.4):

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{від}}(y_3) &= \mu^{\text{в}}(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{од}}(x_{24}) \wedge \\
 & \wedge \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7); \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^{\text{пс}}(y_3) &= \mu^{\text{с}}(y_5) \vee \\
 & \vee \mu^{\text{в}}(y_4) \cdot \mu^{\text{с}}(y_5) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \cdot \mu^{\text{с}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7); \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{пд}}(y_3) = & \mu^{\text{в}}(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{22}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{нс}}(x_{24}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7) \vee \\ & \vee \mu^{\text{е}}(x_{22}); \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{по}}(y_3) = & \mu^{\text{е}}(x_{21}) \vee \mu^{\text{в}}(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \\ & \wedge \mu^{\text{е}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{нс}}(x_{24}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7); \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{оф}}(y_3) = & \mu^3(y_4) \vee \\ & \vee \mu^3(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{нс}}(x_{24}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7) \vee \\ & \vee \mu^{\text{м}}(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{нс}}(x_{24}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7) \vee \\ & \vee \mu^{\text{м}}(y_4) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{20}) \vee \mu^{\text{м}}(y_4) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{23}); \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{т}}(y_3) = & \mu^{\text{нд}}(y_6) \vee \mu^{\text{н}}(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu^{\text{н}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{од}}(x_{24}) \cdot \mu^{\text{нд}}(y_6) \cdot \mu^{\text{н}}(y_7); \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{вм}}(y_3) = & \mu^{\text{е}}(y_7) \vee \mu^{\text{н}}(y_4) \cdot \mu^{\text{н}}(y_5) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{20}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{21}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu^{\text{н}}(x_{23}) \cdot \mu^{\text{од}}(x_{24}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_6) \cdot \mu^{\text{е}}(y_7). \end{aligned} \quad (3.28)$$

По базі знань з табл. 3.16 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення можливості деформації основи, що відповідає співвідношенню (3.5):

$$\begin{aligned} \mu^{\text{в}}(y_4) = & \mu^{\text{н}}(x_{25}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{26}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_8) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{27}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{28}) \wedge \\ & \wedge \mu^{\text{н}}(x_{29}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{30}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{31}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{32}) \vee \mu^{\text{н}}(x_{25}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{26}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_8) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{27}) \wedge \\ & \wedge \mu^{\text{н}}(x_{28}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{29}) \cdot \mu^{\text{нв}}(x_{30}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{31}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{32}); \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{м}}(y_4) = & \mu^{\text{н}}(x_{25}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{26}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_8) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{27}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{28}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{29}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{30}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{31}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{32}) \vee \\ & \vee \mu^{\text{н}}(x_{25}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{26}) \cdot \mu^{\text{д}}(y_8) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{27}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{28}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{29}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{30}) \cdot \mu^{\text{н}}(x_{31}) \cdot \mu^{\text{е}}(x_{32}) \vee \end{aligned}$$

$$\vee \mu^H(x_{25}) \cdot \mu^H(x_{26}) \cdot \mu^D(y_8) \cdot \mu^E(x_{27}) \cdot \mu^{HB}(x_{28}) \cdot \mu^H(x_{29}) \cdot \mu^H(x_{31}) \cdot \mu^H(x_{32}); \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \mu^3(y_4) = & \mu^E(x_{25}) \cdot \mu^E(x_{26}) \cdot \mu^{HD}(y_8) \cdot \mu^H(x_{27}) \cdot \mu^E(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{29}) \cdot \mu^E(x_{30}) \cdot \mu^E(x_{31}) \cdot \mu^E(x_{32}) \vee \\ & \vee \mu^E(x_{25}) \vee \mu^E(x_{26}) \vee \mu^{HD}(y_8) \vee \mu^H(x_{27}) \vee \mu^E(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{29}) \vee \\ & \vee \mu^E(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{32}) \vee \mu^E(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{30}) \vee \mu^E(x_{28}) \cdot \mu^{HB}(x_{30}) \vee \\ & \vee \mu^E(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{31}) \vee \mu^{HB}(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{29}) \vee \mu^{HB}(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{31}) \vee \\ & \vee \mu^{HB}(x_{28}) \cdot \mu^E(x_{32}) \vee \mu^E(x_{29}) \cdot \mu^E(x_{30}) \cdot \mu^E(x_{32}) \vee \mu^E(x_{31}) \cdot \mu^E(x_{32}). \end{aligned} \quad (3.31)$$

По базі знань з табл. 3.17 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення можливості дотримання вимог до осадового шва, що відповідає співвідношенню (3.6):

$$\mu^D(y_8) = \mu^H(x_{33}) \cdot \mu^E(x_{34}) \vee \mu^{HP}(x_{33}); \quad (3.32)$$

$$\mu^{HD}(y_8) = \mu^H(x_{33}) \cdot \mu^H(x_{34}) \vee \mu^H(x_{33}) \cdot \mu^{EH}(x_{34}). \quad (3.33)$$

По базі знань з табл. 3.18 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення можливості статичного перевантаження, що відповідає співвідношенню (3.7):

$$\mu^H(y_5) = \mu^H(x_{35}) \cdot \mu^H(x_{36}) \cdot \mu^H(x_{37}) \cdot \mu^H(x_{38}); \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \mu^E(y_5) = & \mu^E(x_{35}) \vee \mu^E(x_{36}) \vee \mu^E(x_{37}) \vee \mu^E(x_{38}) \vee \\ & \vee \mu^E(x_{35}) \cdot \mu^E(x_{36}) \cdot \mu^E(x_{37}) \cdot \mu^E(x_{38}). \end{aligned} \quad (3.35)$$

По базі знань з табл. 3.19 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення дотримання вимог до температурного шва, що відповідає співвідношенню (3.8):

$$\mu^D(y_6) = \mu^H(x_{39}) \cdot \mu^E(x_{40}) \vee \mu^{HP}(x_{39}); \quad (3.36)$$

$$\mu^{HD}(y_6) = \mu^H(x_{39}) \cdot \mu^H(x_{40}) \vee \mu^H(x_{39}) \cdot \mu^{EH}(x_{40}). \quad (3.37)$$

По базі знань з табл. 3.20 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення можливості порушень технології виробництва та неврахувань властивостей матеріалів, що відповідає співвідношенню (3.9):

$$\mu^{\epsilon}(y_7) = \mu^{\epsilon}(x_{41}) \vee \mu^{\epsilon}(x_{42}) \vee \mu^{\epsilon}(x_{41}) \cdot \mu^{\epsilon}(x_{42}); \quad (3.36)$$

$$\mu^{\text{H}}(y_7) = \mu^{\text{H}}(x_{41}) \cdot \mu^{\text{H}}(x_{42}) \vee \mu^{\text{HB}}(x_{41}) \cdot \mu^{\text{H}}(x_{42}) \vee \mu^{\text{H}}(x_{41}) \cdot \mu^{\text{HB}}(x_{42}). \quad (3.37)$$

Прийняття рішення з визначення причини виникнення конкретної тріщини будемо проводити за таким алгоритмом:

- Крок 1.* Визначити значення частинних параметрів стану $x_1 \dots x_{42}$ об'єкта, що діагностуємо.
- Крок 2.* Знайти ступені належності частинних параметрів стану лінгвістичним термам з в табл. 3.10.
- Крок 3.* Підставити знайдені на кроці 2 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.38) і (3.39) та обчислити ступені належності змінної y_7 до термів « ϵ » та «н», відповідно.
- Крок 4.* Підставити знайдені на кроці 2 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.36) і (3.37) та обчислити ступені належності змінної y_6 до термів «д» та «нд», відповідно.
- Крок 5.* Підставити знайдені на кроці 2 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.34) і (3.35) та обчислити ступені належності змінної y_5 до термів «н» та « ϵ », відповідно.
- Крок 6.* Підставити знайдені на кроці 2 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.32) і (3.33) та обчислити ступені належності змінної y_8 до термів «д» та «нд», відповідно.
- Крок 7.* Підставити знайдені на кроках 2 та 6 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.29), (3.30) і (3.31) та обчислити ступені належності змінної y_4 до термів «в», «м» та «з», відповідно.
- Крок 8.* Підставити знайдені на кроках 2, 3, 4, 5 та 7 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.22) – (3.28) та обчислити ступені належності змінної y_3 до термів «від», «пс», «пд», «по», «оф», «т» та «вм», відповідно.
- Крок 9.* Підставити знайдені на кроці 2 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.19), (3.20) і (3.21) та обчислити ступені належності змінної y_2 до термів «бп», «п» та «дп», відповідно.
- Крок 10.* Підставити знайдені на кроках 2 та 9 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.16), (3.17) і (3.18) та обчислити ступені належності змінної y_1 до термів «н», «п» та «дп», відповідно.
- Крок 11.* Підставити знайдені на кроках 2, 8, та 10 ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.10) – (3.15) та обчислити ступені на-

лежності рішення до термів $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$, відповідно.

Крок 12. Як причину виникнення тріщини обрати терм із множини $\{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6\}$ з максимальним ступенем належності.

Проілюструємо використання запропонованих моделей та алгоритму на прикладі визначення причини появи тріщини в спортзалі школи с. Кукули Вінницької області. Значення частинних параметрів стану об'єкта, що діагностується, наведені в першій графі табл. 3.21.

За формулою дзіноподібної функції (табл. 2.1) та даним табл. А.1 знайдемо ступені належності значень параметрів стану нечітким термам та зведемо їх в табл. 3.21.

Таблиця 3.21

Ступені належності частинних параметрів стану

Значення параметрів стану	Ступені належності параметрів стану нечітким термам		
$x_1 =$ стіна з прорізом	$\mu^{сг}(x_1)=0.038$ $\mu^{пг}(x_1)=0.2$	$\mu^{п}(x_1)=0.059$ $\mu^{пп}(x_1)=0.5$	$\mu^{пп}(x_1)=0.1$ $\mu^{сп}(x_1)=1$
$x_2 =$ несуча	$\mu^{hh}(x_2)=0.038$	$\mu^{ch}(x_2)=0.138$	$\mu^h(x_2)=1$
$x_3 = 13$	$\mu^h(x_3)=0.973$	$\mu^п(x_3)=0.36$	$\mu^{3п}(x_3)=0.01$
$x_4 = 0.2$	$\mu^h(x_4)=0.2$	$\mu^m(x_4)=0.308$	$\mu^б(x_4)=0.015$
$x_5 =$ порушена	$\mu^{пп}(x_5)=0.265$	$\mu^п(x_5)=1$	
$x_6 = 0$	$\mu^h(x_6)=1$	$\mu^c(x_6)=0.038$	
$x_7 = 0$	$\mu^h(x_7)=1$	$\mu^{h3}(x_7)=0.054$	$\mu^c(x_7)=0.014$
$x_8 = 0$	$\mu^h(x_8)=1$	$\mu^c(x_8)=0.059$	
$x_9 = 0$	$\mu^h(x_9)=0.862$	$\mu^{h3}(x_9)=0.236$	$\mu^c(x_9)=0.125$
$x_{10} = 0$	$\mu^h(x_{10})=1$	$\mu^{h3}(x_{10})=0.054$	$\mu^c(x_{10})=0.014$
$x_{11} = 0$	$\mu^h(x_{11})=1$	$\mu^{h3}(x_{11})=0.054$	$\mu^c(x_{11})=0.014$
$x_{12} = 0$	$\mu^h(x_{12})=1$	$\mu^{h3}(x_{12})=0.054$	$\mu^c(x_{12})=0.014$
$x_{13} = 0$	$\mu^h(x_{13})=1$	$\mu^{h3}(x_{13})=0.054$	$\mu^c(x_{13})=0.014$
$x_{14} = 0$	$\mu^h(x_{14})=1$	$\mu^{h3}(x_{14})=0.054$	$\mu^c(x_{14})=0.014$
$x_{15} =$ у верхній частині	$\mu^{чв}(x_{15})=0.046$ $\mu^{мв}(x_{15})=0.233$ $\mu^{вп}(x_{15})=0.549$	$\mu^{мс}(x_{15})=0.071$ $\mu^{оп}(x_{15})=0.549$ $\mu^{hc}(x_{15})=0.253$	$\mu^{мп}(x_{15})=0.019$ $\mu^{вч}(x_{15})=1$
$x_{16} = 80$	$\mu^b(x_{16})=0.5$	$\mu^k(x_{16})=0.155$	$\mu^r(x_{16})=0.015$

Продовження табл. 3.21

Значення параметрів стану	Ступені належності параметрів стану нечітким термам
$x_{17}=0.05$	$\mu^{BP}(x_{17})=0.8$ $\mu^{PP}(x_{17})=0.165$ $\mu^{HP}(x_{17})=0.011$
$x_{18}=8$	$\mu^{BOJ}(x_{18})=0.015$ $\mu^{DP}(x_{18})=0.1$ $\mu^{PO3}(x_{18})=0.39$ $\mu^{BEl}(x_{18})=0.5$ $\mu^{KP}(x_{18})=0.121$
$x_{19}=3.5$	$\mu^K(x_{19})=0.002$ $\mu^{cD}(x_{19})=0.013$ $\mu^D(x_{19})=0.038$
$x_{20}=0$	$\mu^H(x_{20})=1$ $\mu^e(x_{20})=0.01$
$x_{21}=0$	$\mu^H(x_{21})=1$ $\mu^e(x_{21})=0.022$
$x_{22}=0$	$\mu^H(x_{22})=1$ $\mu^e(x_{22})=0.01$
$x_{23}=0$	$\mu^H(x_{23})=1$ $\mu^e(x_{23})=0.022$
$x_{24}=\text{наскрізна}$	$\mu^{oD}(x_{24})=0.038$ $\mu^{HC}(x_{24})=1$
$x_{25}=0$	$\mu^H(x_{25})=1$ $\mu^e(x_{25})=0.014$
$x_{26}=\epsilon$	$\mu^H(x_{26})=0.083$ $\mu^e(x_{26})=1$
$x_{27}=0.95$	$\mu^e(x_{27})=0.011$ $\mu^H(x_{27})=0.8$
$x_{28}=\epsilon$	$\mu^H(x_{28})=0.138$ $\mu^{HB}(x_{28})=0.39$ $\mu^e(x_{28})=1$
$x_{29}=0$	$\mu^H(x_{29})=1$ $\mu^e(x_{29})=0.022$
$x_{30}=0$	$\mu^H(x_{30})=1$ $\mu^{HB}(x_{30})=0.038$ $\mu^e(x_{30})=0.001$
$x_{31}=0$	$\mu^H(x_{31})=1$ $\mu^e(x_{31})=0.014$
$x_{32}=\text{немає}$	$\mu^H(x_{32})=1$ $\mu^e(x_{32})=0.138$
$x_{33}=0$	$\mu^{HP}(x_{33})=1$ $\mu^H(x_{33})=0.022$
$x_{34}=0$	$\mu^H(x_{34})=1$ $\mu^{eH}(x_{34})=0.138$ $\mu^e(x_{34})=0.038$
$x_{35}=\text{немає}$	$\mu^H(x_{35})=1$ $\mu^e(x_{35})=0.083$
$x_{36}=\text{немає}$	$\mu^H(x_{36})=1$ $\mu^e(x_{36})=0.083$
$x_{37}=\text{немає}$	$\mu^H(x_{37})=1$ $\mu^e(x_{37})=0.083$
$x_{38}=\text{немає}$	$\mu^H(x_{38})=1$ $\mu^e(x_{38})=0.083$
$x_{39}=0$	$\mu^{HP}(x_{39})=1$ $\mu^H(x_{39})=0.038$
$x_{40}=0$	$\mu^H(x_{40})=1$ $\mu^{eH}(x_{40})=0.138$ $\mu^e(x_{40})=0.01$
$x_{41}=\text{невідомо}$	$\mu^H(x_{41})=0.2$ $\mu^{HB}(x_{41})=1$ $\mu^e(x_{41})=0.2$
$x_{42}=0.75$	$\mu^H(x_{42})=0.02$ $\mu^{HB}(x_{42})=0.419$ $\mu^e(x_{42})=0.1$

Підставляючи знайдені ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.38) і (3.39), що визначають можливість появи тріщин через порушення технології виробництва робіт або властивостей матеріалу, знаходимо:

$$\mu^e(y_7) = 0.2 \vee 0.1 \vee 0.2 \cdot 0.1 = 0.2;$$

$$\mu^H(y_7) = 0.2 \cdot 0.02 \vee 1 \cdot 0.02 \vee 0.2 \cdot 0.419 = 0.2.$$

Підставляючи знайдені ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.36) і (3.37), що визначають дотримання вимог до температурного шва, знаходимо:

$$\mu^D(y_6) = 0.038 \cdot 0.01 \vee 1 = 1;$$

$$\mu^{HD}(y_6) = 0.038 \cdot 1 \vee 0.038 \cdot 0.138 = 0.038.$$

Підставляючи ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.34) і (3.35), що визначають можливість статичного перевантаження, знаходимо:

$$\mu^H(y_5) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu^e(y_5) = 0.083 \vee 0.083 \vee 0.083 \vee 0.083 \vee 0.083 \cdot 0.083 \cdot 0.083 \cdot 0.083 = 0.083.$$

Підставляючи знайдені ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.32) і (3.33), що визначають дотримання вимог до осадового шва:

$$\mu^D(y_8) = 0.022 \cdot 0.038 \vee 1 = 1;$$

$$\mu^{HD}(y_8) = 0.022 \cdot 1 \vee 0.022 \cdot 0.138 = 0.022.$$

Підставляючи ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.29) – (3.31), що визначають можливість виникнення дефекту основи, знаходимо:

$$\begin{aligned} \mu^B(y_4) &= 1 \cdot 0.083 \cdot 1 \cdot 0.011 \cdot 0.138 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.083 \cdot 1 \cdot 0.011 \cdot 0.138 \cdot 1 \cdot 0.138 \cdot 1 \cdot 1 = 0.011; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^M(y_4) &= 1 \cdot 0.83 \cdot 1 \cdot 0.011 \cdot 0.138 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.83 \cdot 1 \cdot 0.011 \cdot 0.138 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.138 = 0.011; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^3(y_4) &= 0.014 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 0.8 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 0.038 \cdot 0.014 \cdot 0.1138 \vee \\ &\vee 0.014 \vee 1 \vee 0.022 \vee 0.8 \vee 1 \cdot 0.022 \vee 1 \cdot 0.038 \vee 1 \cdot 0.138 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.014 \vee 0.39 \cdot 0.022 \vee 0.39 \cdot 0.014 \vee 0.39 \cdot 0.138 \vee \\ &\vee 0.022 \cdot 0.038 \cdot 0.138 \vee 0.014 \cdot 0.138 = 1. \end{aligned}$$

Підставляючи ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.22) – (3.28), що визначають додаткову інформацію, знаходимо:

$$\mu^{\text{від}}(y_3) = 0.011 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 0.2 = 0.011;$$

$$\mu^{\text{пс}}(y_3) = 0.083 \vee 0.011 \cdot 0.083 \cdot 0.01 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 1 \cdot 0.2 = 0.083;$$

$$\mu^{\text{по}}(y_3) = 0.022 \vee 0.011 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.2 = 0.011;$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{оф}}(y_3) &= 1 \vee 1 \cdot 1 \cdot 0.01 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.2 \vee \\ &\vee 0.011 \cdot 1 \cdot 0.01 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.022 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.2 \vee 0.011 \cdot 0.01 \vee \\ &\vee 0.011 \cdot 0.022 = 1; \end{aligned}$$

$$\mu^{\text{т}}(y_3) = 0.038 \vee 0.011 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 0.038 \cdot 0.2 = 0.038;$$

$$\mu^{\text{вм}}(y_3) = 0.2 \vee 0.011 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 0.2 = 0.2.$$

Підставляючи ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.19) - (3.21), що визначають руйнування кладки, знаходимо:

$$\mu^{\text{бп}}(y_2) = 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \vee 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{п}}(y_2) &= 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.054 \vee 0.054 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 0.054 \vee \\ &\vee 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.054 \vee 0.014 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.014 \vee 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.054 = \\ &= 0.054; \end{aligned}$$

$$\mu^{\text{вм}}(y_3) = 0.2 \vee 0.011 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 0.2 = 0.2.$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{дп}}(y_2) &= 0.014 \cdot 0.014 \cdot 0.014 \cdot 0.014 \vee 0.014 \cdot 0.014 \vee 0.014 \cdot 0.014 \vee \\ &\vee 0.014 \cdot 0.014 \vee 0.054 \cdot 0.054 \cdot 0.054 \cdot 0.054 \vee \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \vee 0.14 \cdot 0.054 \cdot 0.054 \cdot 0.014 \vee 0.014 \cdot 0.054 \cdot 0.054 \cdot 0.014 \vee \\ & \vee 0.014 \cdot 0.054 \cdot 0.054 \cdot 0.014 = 0.054. \end{aligned}$$

Підставляючи ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.16) – (3.18), що визначають стан конструкції, знаходимо:

$$\begin{aligned} \mu^H(y_1) &= 0.973 \cdot 0.2 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 = 0.265; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{\Pi}(y_1) &= 0.973 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.236 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.36 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.36 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 0.054 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 0.054 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.1 \cdot 0.2 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.059 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.36 \cdot 0.015 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.236 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.2 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.36 \cdot 0.2 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.236 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.1 \cdot 0.308 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 1 \vee \\ & \vee 0.973 \cdot 0.2 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.862 \cdot 0.014 = 0.265; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{\text{ДП}}(y_1) &= 0.1 \cdot 1 \cdot 0.038 \vee 0.015 \cdot 0.054 \cdot 0.059 \cdot 0.236 \vee 0.054 \vee \\ & \vee 1 \cdot 0.125 \cdot 0.014 \vee 0.1 \cdot 0.015 \cdot 1 \cdot 0.014 \cdot 0.059 \vee \\ & \vee 0.038 \cdot 0.054 \cdot 0.014 \cdot 0.014 \vee 0.015 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 0.014 \cdot 0.059 \vee \\ & \vee 0.36 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 0.014 \cdot 0.059 \cdot 0.014 \vee \\ & \vee 0.1 \cdot 0.308 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 0.059 \cdot 0.125 \vee \\ & \vee 0.36 \cdot 0.308 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 0.054 \cdot 0.054 \cdot 0.059 \vee \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\vee 0.1 \cdot 0.015 \cdot 0.038 \cdot 0.014 \cdot 0.059 \vee \\ &\vee 0.36 \cdot 0.015 \cdot 1 \cdot 0.014 \cdot 0.059 \cdot 0.014 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 0.015 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 0.014 \cdot 1 \cdot 0.236 \cdot 0.054 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 0.015 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 0.054 \cdot 0.014 \cdot 0.059 \cdot 0.125 \cdot 0.014 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 0.015 \cdot 1 \cdot 0.038 \cdot 0.014 \cdot 1 \cdot 0.236 \cdot 0.054 = 0.054. \end{aligned}$$

Підставляючи знайдені ступені належності в нечіткі логічні рівняння (3.10) – (3.19), що визначають причину виникнення тріщини, знаходимо:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(D) &= 0.059 \cdot 1 \cdot 0.265 \cdot 0.549 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.011 \vee \\ &\vee 0.054 \cdot 0.046 \cdot 0.155 \cdot 0.083 \vee 1 \cdot 0.054 \cdot 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.011 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.083 \vee 1 \cdot 0.054 \cdot 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.165 \cdot 0.1 \cdot 0.083 \vee \\ &\vee 0.038 \cdot 0.119 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.083 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 1 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.038 \cdot 0.083 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.549 \cdot 0.8 \cdot 0.083 = 0.083; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(D) &= 0.119 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.01 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 0.265 \cdot 0.046 \cdot 0.155 \cdot 0.165 \cdot 0.015 \cdot 1 \cdot 0.01 \vee \\ &\vee 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.01 \vee \vee 1 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.01 \vee \\ &\vee 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.01 \vee 0.071 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.01 = 0.01; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_3}(D) &= 0.038 \cdot 1 \cdot 0.071 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.022 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.39 \cdot 0.038 \cdot 0.022 \vee 0.549 \cdot 0.022 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.265 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.002 \cdot 0.022 = 0.022; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_4}(D) &= 0.054 \cdot 0.046 \cdot 0.155 \cdot 1 \vee 1 \cdot 0.8 \cdot 1 \vee 1 \cdot 0.011 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 0.046 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.121 \cdot 1 \cdot 0.011 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.054 \cdot 0.046 \cdot 0.155 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.011 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 0.265 \cdot 0.046 \cdot 0.155 \cdot 0.011 \cdot 0.5 \cdot 0.011 \vee \\ &\vee 0.138 \cdot 0.265 \cdot 0.071 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.011 \vee \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\vee 1 \cdot 0.138 \cdot 0.265 \cdot 0.071 \cdot 0.155 \cdot 0.011 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.265 \cdot 0.046 \cdot 0.5 \cdot 0.121 \cdot 1 \cdot 1 \vee \\ &\vee 0.038 \cdot 1 \cdot 0.253 \cdot 0.5 \cdot 0.011 \cdot 0.5 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 0.265 \cdot 0.549 \cdot 0.155 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 0.253 \cdot 0.5 \cdot 0.038 \cdot 1 \vee 1 \cdot 0.265 \cdot 0.253 \cdot 0.155 \cdot 1 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 1 \cdot 0.265 \cdot 0.253 \cdot 0.011 \cdot 0.39 \cdot 0.038 \cdot 1 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 1 \cdot 0.549 \cdot 0.1 \cdot 1 \vee \\ &\vee 0.2 \cdot 0.038 \cdot 0.265 \cdot 0.119 \cdot 0.015 \cdot 0.165 \cdot 0.39 \cdot 1 \cdot 1 \vee \\ &\vee 0.5 \cdot 0.038 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.155 \cdot 0.013 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.013 \cdot 1 \vee \\ &\vee 0.038 \cdot 1 \cdot 0.054 \cdot 0.071 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.39 \cdot 1 \vee \\ &\vee 1 \cdot 1 \cdot 0.549 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 1 \vee 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 1 = 0.8; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_5}(D) &= 1 \cdot 1 \cdot 0.5 \cdot 0.8 \cdot 0.038 \vee \\ &1 \cdot 0.138 \cdot 0.549 \cdot 0.155 \cdot 0.165 \cdot 0.015 \cdot 0.038 \vee \\ &\vee 0.138 \cdot 0.265 \cdot 1 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.038 \cdot 0.038 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.165 \cdot 0.015 \cdot 0.038 \vee \\ &\vee 0.1 \cdot 0.138 \cdot 0.265 \cdot 0.549 \cdot 0.5 \cdot 0.165 \cdot 0.1 \cdot 0.038 = 0.038; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_6}(D) &= 0.1 \cdot 1 \cdot 0.233 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.013 \cdot 0.2 \vee \\ &\vee 1 \cdot 0.138 \cdot 0.054 \cdot 0.071 \cdot 0.5 \cdot 0.165 \cdot 0.015 \cdot 0.2 \vee \\ &\vee 0.5 \cdot 0.038 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 0.155 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.013 \cdot 0.2 \vee \\ &\vee 0.138 \cdot 0.054 \cdot 0.046 \cdot 0.155 \cdot 0.419 \vee \\ &\vee 0.265 \cdot 0.233 \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 0.1. \end{aligned}$$

Таким чином, в результаті логічного висновку отримана така нечітка множина: $\tilde{D} = \left(\frac{0.083}{d_1}, \frac{0.01}{d_2}, \frac{0.022}{d_3}, \frac{0.8}{d_4}, \frac{0.038}{d_5}, \frac{0.1}{d_6} \right)$. Найбільший ступінь (0.8) має рішення d_4 , тому причиною появи тріщини обираємо «дефекти

фундаментів та деформації основи». Зазначимо, що поставлений діагноз збігається з дійсною причиною появи тріщини.

3.6. Навчання нечіткої моделі діагностування тріщин цегляних конструкцій

За архівними матеріалами ЗАТ «Вінницький проектний інститут» з діагностування 89 тріщин цегляних конструкцій синтезована вибірка даних для навчання нечіткої моделі. Причини виникнення тріщин, які використовуються для навчання моделі, є верифікованими, тобто правильність діагностування була підтверджена відповідними експериментальними дослідженнями та теоретичними розрахунками. Експериментальні дані поділені на навчальну та тестову вибірки обсягом 55 і 34 тріщин, відповідно. Інформація про об'єкти з навчальної та тестувальної вибірок наведена в табл. 3.22 та табл. 3.23. Вибірки даних наведені в [45].

Таблиця 3.22

Об'єкти навчальної вибірки

№№	Об'єкт
24, 45- 47	Гуртожиток ВАТ «Завод тракторних агрегатів», м. Вінниця
12, 18, 51	Головний корпус ВАТ «Машинобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
16-17, 19-23	Водопровідна очисна станція ВАТ «Машинобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
27, 28	Ливарний цех ВАТ «Машинобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
52-55	Кузня ВАТ «Машинобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
25	Очисні споруди ВАТ «Приладобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
26	Головний корпус ВАТ «Приладобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
30, 31	Відділення сушіння солоду ВАТ «Славутський солодовий завод», м. Славута, Хмельницька обл.
29	Їдальня дитячого табору «Орлятко», м. Генічеськ, Херсонська обл.

Продовження табл. 3.22

№№	Об'єкт
13-15, 32-35	Закритий розподільний пристрій, м. Шаргород, Вінницька обл.
36-44	Корпус №2 фабрики «Льонок», м. Коростень, Житомирська обл.
50	Корпус школи, с. Кукули, Вінницька обл.
1-3, 4- 7, 8- 11, 49	Спортзал школи, с. Кукули, Вінницька область
48	Їдальня школи, с. Ольгополь, Вінницька обл.

Таблиця 3.23

Об'єкти тестової вибірки

№№	Об'єкт
1, 2	Гуртожиток ВАТ «Завод тракторних агрегатів», м.Вінниця
3, 4	Очисні споруди ВАТ «Приладобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
5-7	Їдальня школи, с. Ольгополь, Вінницька обл.
8	Трансформаторна підстанція спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
9	Спиртосховище спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
10	Адміністративний корпус спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
11	Котельня спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
12	Насосна станція спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
13-16	Головний корпус спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
17	Вузол антисептування спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
18	Склад №2 спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
19	Вуглекислотний цех спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
20, 21	Центральний склад спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
22, 23	Вагова спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
24	Клуб спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
25	Солодовий корпус спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
26, 27	Гараж спиртозаводу, м. Бершадь, Вінницька обл.
28, 29, 30, 31	Кузня ВАТ «Машинобудівний завод», м. Могилів-Подільський, Вінницька обл.
32, 34	Закритий розподільний пристрій, м. Шаргород, Вінницька обл.
33	Відділення сушіння солоду ВАТ «Славутський солодовий завод», м. Славута, Хмельницька обл.

Для настроювання нечіткої моделі обрані такі параметри: коефіцієнти концентрацій і координати максимумів функцій належності нечітких термів та вагові коефіцієнти правил нечітких баз знань. Кількість параметрів функцій належності дорівнює $117 \cdot 2 = 234$. Додаючи до цього числа кількість нечітких правил, отримуємо що загальна кількість параметрів, що настроюються, дорівнює $234 + 151 = 385$. Для зменшення розмірності задачі оптимізації (2.6) та збереження прозорості нечіткої моделі після навчання не будемо настроювати координати максимумів крайніх термів та не будемо не змінювати вагові коефіцієнтів 23-х правил, в абсолютній достовірності яких експерти впевнені. Це правила з порядковими номерами: 50, 79, 82, 88, 96, 98, 99, 102, 104, 109, 111, 112, 117, 132 – 134, 136, 141 – 144, 148 та 149. Таким чином, в задачі оптимізації (2.6) залишається $385 - 2 \cdot 42 - 23 = 278$ керованих змінних.

Навчання нечіткої моделі здійснено генетичним алгоритм з пункту 2.6.2 при таких параметрах: $pop_size = 20$; $cross_num = 15$; $mut_num = 10$; $gene_mut = 15$; $epoch_num = 200$. В результаті навчання отримані оптимальні значення параметрів функцій належностей нечітких термів та вагових коефіцієнтів правил баз знань. Оптимальні значення параметрів нечіткої моделі наведені в додатку А.

Співставлення дійсних причин появи тріщин з результатами прийняття рішення за нечіткою моделлю наведено на рис. 3.2. Після навчання кількість помилкових рішень на навчальній вибірці зменшилася в 4 рази і складає 2 помилки на 55 тріщин. На тестовій вибірці з 34 тріщин прийнято 2 помилкових рішення. Загалом з 89 тріщин збігання модельного рішення з дійсною причиною появи тріщини спостерігалось в 85 випадках, тобто в 95.5%. В решті випадках дійсній причині відповідало друге за рангом модельне рішення.

Розподіл діагностичних помилок представлено рис. 3.3. На рисунку використовуються такі позначення: $N = 89$ – загальна кількість тріщин з верифікованими причинами; N_i – кількість тріщин, об'єктивною причиною виникнення яких є d_i , $i = \overline{1,6}$; N_{ij} – кількість тріщин, для яких модельний діагноз є d_j , а дійсною причиною їх виникнення є d_i , $i, j = \overline{1,6}$. Статистичні оцінки якості діагностування по кожному типу рішень є такими:

$$\begin{array}{llllll} \hat{p}_{11} = 0.778; & \hat{p}_{12} = 0; & \hat{p}_{13} = 0; & \hat{p}_{14} = 0.111; & \hat{p}_{15} = 0; & \hat{p}_{16} = 0.111; \\ \hat{p}_{21} = 0; & \hat{p}_{22} = 1; & \hat{p}_{23} = 0; & \hat{p}_{24} = 0; & \hat{p}_{25} = 0; & \hat{p}_{26} = 0; \\ \hat{p}_{31} = 0; & \hat{p}_{32} = 0; & \hat{p}_{33} = 1; & \hat{p}_{34} = 0; & \hat{p}_{35} = 0; & \hat{p}_{36} = 0; \\ \hat{p}_{41} = 0; & \hat{p}_{42} = 0; & \hat{p}_{43} = 0; & \hat{p}_{44} = 0.982; & \hat{p}_{45} = 0; & \hat{p}_{46} = 0.018; \\ \hat{p}_{51} = 0; & \hat{p}_{52} = 0; & \hat{p}_{53} = 0; & \hat{p}_{54} = 0; & \hat{p}_{55} = 0.889; & \hat{p}_{56} = 0.111; \\ \hat{p}_{61} = 0; & \hat{p}_{62} = 0; & \hat{p}_{63} = 0; & \hat{p}_{64} = 0; & \hat{p}_{65} = 0; & \hat{p}_{66} = 1. \end{array}$$

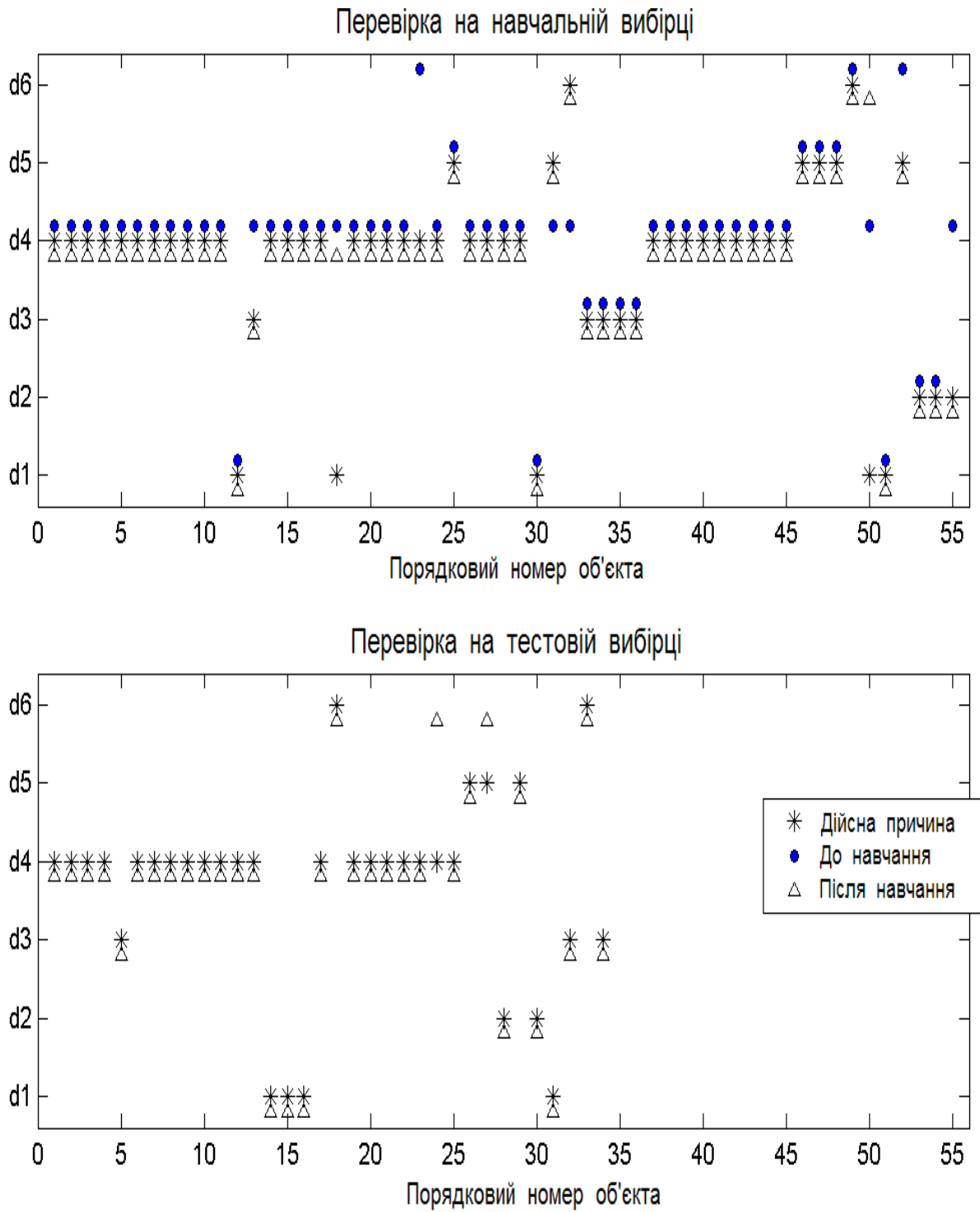


Рис. 3.2. Перевірка діагностичної моделі

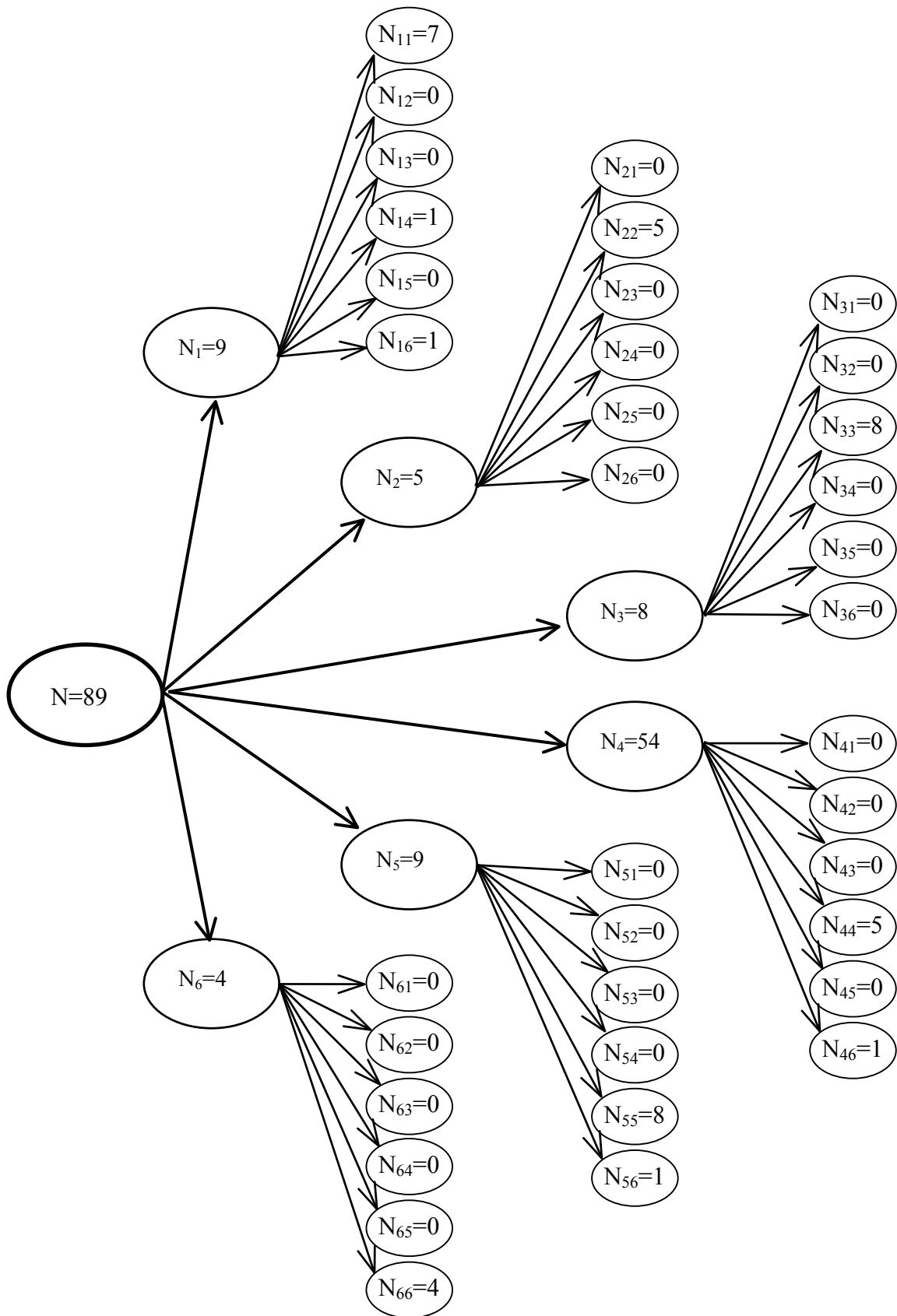


Рис. 3.3. Розподіл помилок діагностування

3.7. Автоматизація діагностування тріщин цегляних конструкцій

На основі запропонованої діагностичної моделі розроблена автоматизована система підтримки прийняття рішень щодо причини появи тріщини цегляної конструкції будівлі. Система реалізована на базі програмної оболонки FuzzyExpert [28, 64] під операційні системи Windows - 95, -98.

Система дозволяє ранжирувати можливі причин появи тріщини цегляної конструкції будівлі на основі аналізу 42-х параметрів стану. Крім цього вона дозволяє будувати однофакторні залежності причини виникнення тріщини від зміни параметрів стану та проводити збір, обробку і зберігання діагностичної інформації. Архітектура системи показана на рис. 3.4.

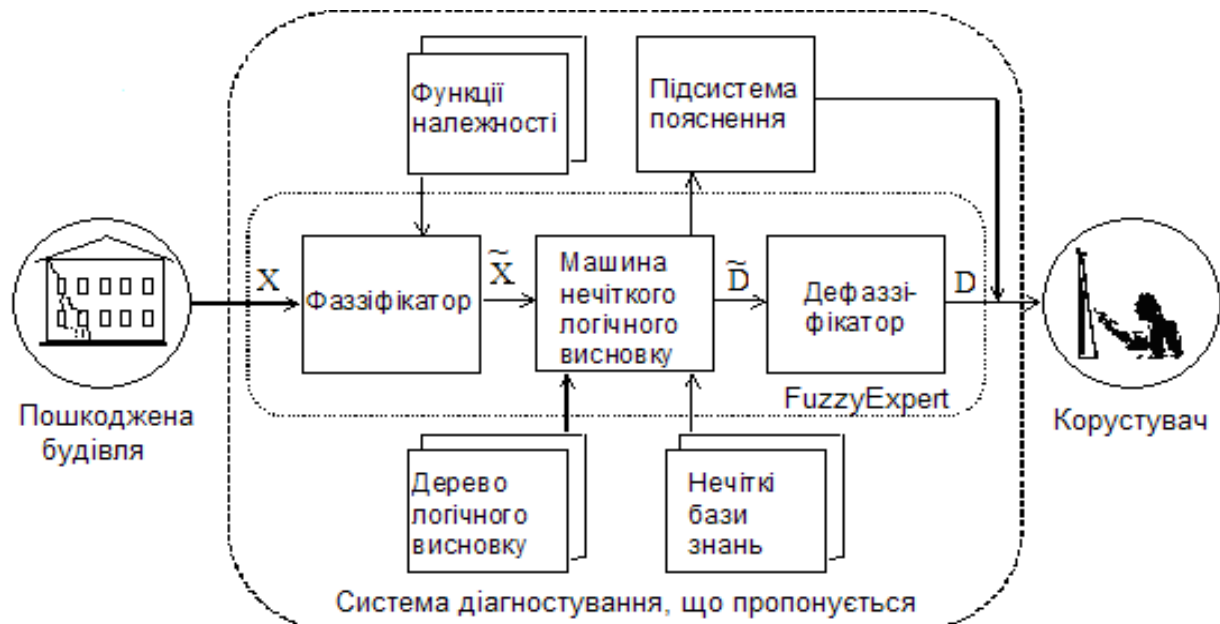


Рис. 3.4. Архітектура автоматизованої системи діагностування

Блоки системи виконують такі функції:

- 1) «Фаззифікатор» перетворює вектор частинних параметрів стану пошкодженої будівлі (X) в вектор ступенів належності параметрів стану до нечітких термів (\tilde{X});
- 2) «Функції належності» являє собою бібліотеку аналітичних залежностей та параметрів функцій належностей термів з нечітких правил;
- 3) «Машина нечіткого логічного висновку» визначає причину появи тріщини в вигляді нечіткої множини (\tilde{D});
- 4) «Дерево логічного висновку» визначає послідовність логічного висновку причини появи тріщини відповідно до співвідношень (3.1)–(3.9);

- 5) «*Нечіткі бази знань*» являють собою бібліотеку експертних правил типу <Якщо – тоді>, які формалізовані засобами теорії нечітких множин;
- 6) «*Дефаззифікатор*» визначає найбільш можливу причину появи тріщини (D) з нечіткої множини-рішення (\tilde{D});
- 7) «*Підсистема пояснення*» обґрунтовує вибір причини появи тріщини шляхом визначення ланки правил, які здійснили найбільш вагомий вплив на процес прийняття рішення. При роботі блока використовуються проміжні результати логічного висновку – вектори ступенів належності укрупнених параметрів стану до нечітких термів (\tilde{Y}).

Крім наведених на рис. 3.4 блоків, що забезпечують інтелектуальну підтримку прийняття діагностичних рішень, система має типові для усіх автоматизованих систем блоки введення і зберігання інформації та протоколювання роботи.

Головне вікно системи, на якому зображено дерево логічного висновку, наведено на рис. 3.5. При роботі в цьому вікні користувач має можливість продивитися структуру діагностичної моделі – дерево висновку і бази знань, та параметри моделі – функції належності. Діалогові вікна функцій належностей та нечітких баз знань показані на рис. 3.6 та 3.7.

Інформація про значення частинних параметрів стану може бути задана одним з трьох способів: числом, лінгвістичним термом або за принципом термометру. Відповідне діалогове вікно наведено на рис. 3.8.

Встановлення причини появи тріщини починається по натиску кнопки <Просчитати дерево> у вікні, що наведено на рис. 3.8. Результати прийняття рішення представляються в текстовій та графічній формі. На рис. 3.9 наведено результати діагностування тріщини в цегляній стіні спортзалу середньої школи с. Кукули (див. підрозділ 3.5). В цьому вікні виводиться і розподілення можливостей по усіх причинах.

Протоколювання роботи системи здійснюється записом в файл частинних параметрів стану, проміжних результатів нечіткого висновку та прийнятого діагностичного рішення. Протоколювання активується вибором в головному меню режиму <Задokumentировать>. Діалогове вікно протоколювання роботи системи наведено на рис. 3.10.

Система надає можливість користувачеві продивитися проміжні результати – значення ступенів належності в нетермінальних вершинах дерева логічного висновку. Ця можливість реалізована в рамках програмної оболонки FuzzyExpert, але вона корисна лише користувачам, які розуміються на теорії нечітких множин. Тому нами розроблена додаткова підсистема пояснення, яка повідомляє ланку правил, що забезпечила прийняття рішення. Крім того вона вказує значення ступенів належності об'єкта, що обстежується, до кожного правила з знайденої ланки. На рис. 3.11 наведено результати роботи підсистеми пояснень при діагностуванні тріщини школи с. Кукули.

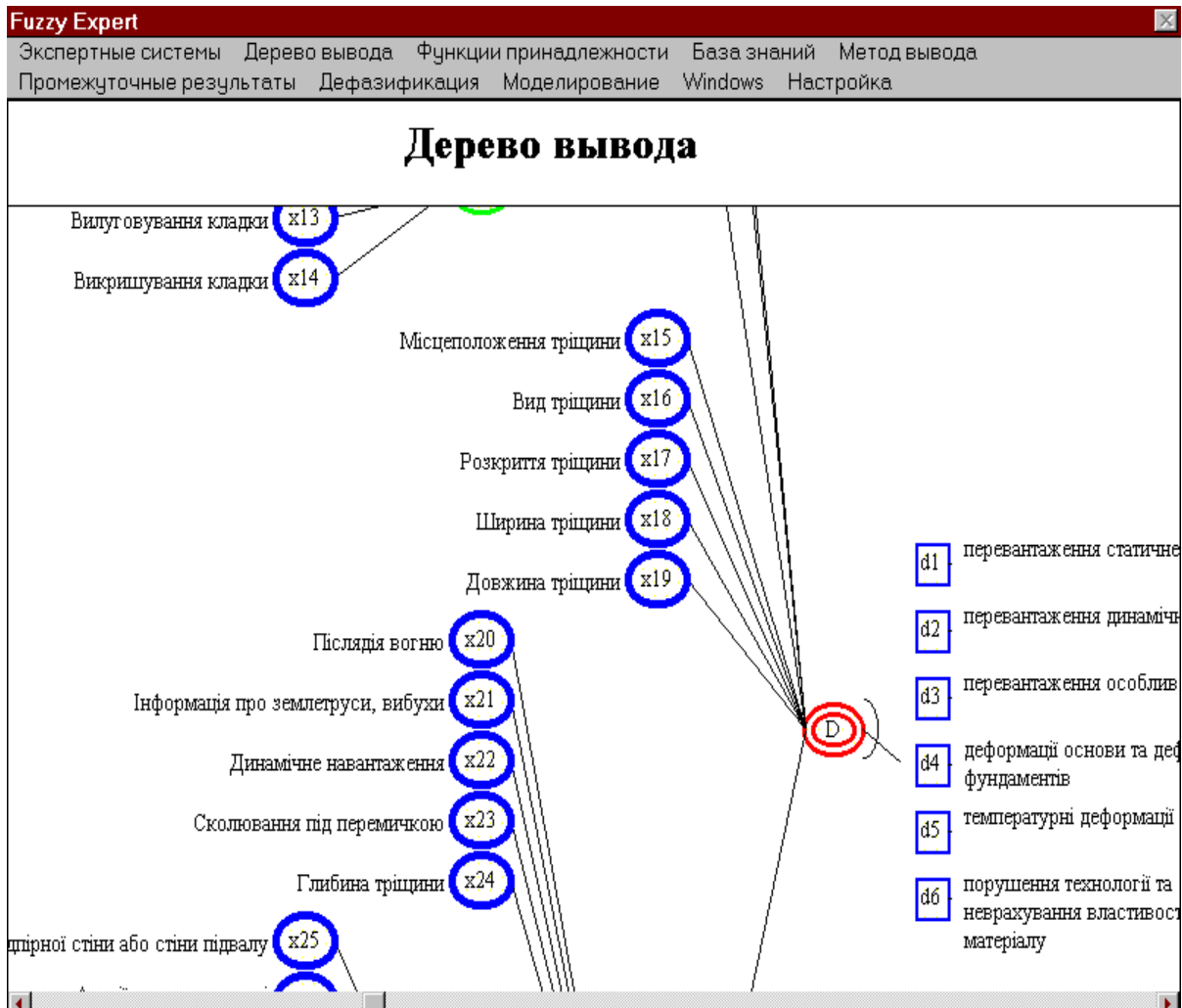


Рис. 3.5. Головне вікно системи

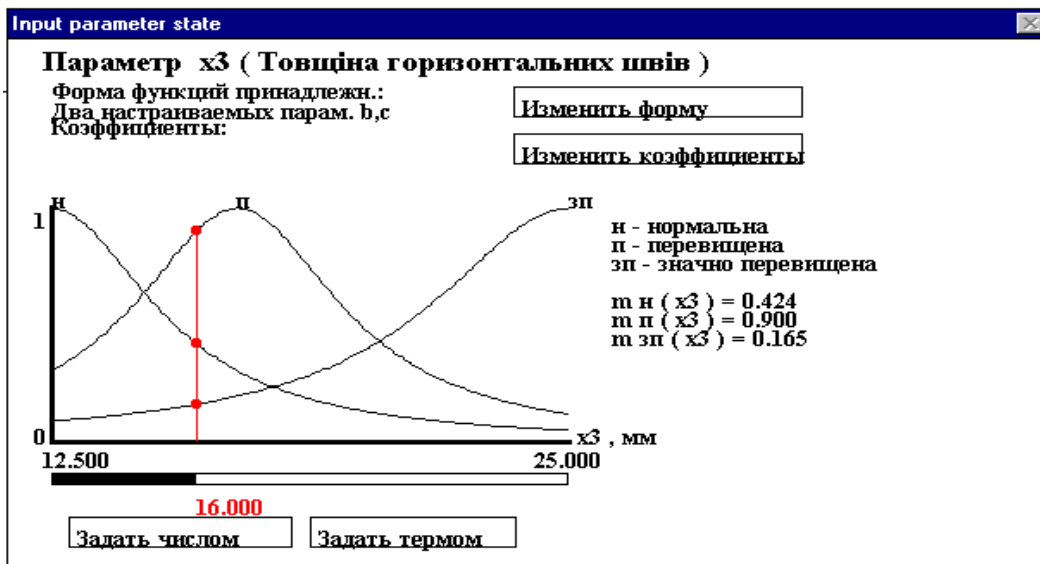


Рис. 3.6. Вікно функцій належності

Knowledge Table					
x11	x12	x13	x14	y2	Wght
нз	н	н	н	бп	0.878
н	н	н	н		1.000
н	нз	н	н		0.732
нз	н	нз	н	п	0.923
нз	н	н	нз		0.974
с	н	н	н		0.508
н	н	н	нз		0.932
с	с	с	с	дп	1.000

Рис. 3.7. Вікно баз знань

Входные переменные

Задайте значения входным переменным

x1	сп		Число	Термом		
x2	н		Число	Термом		
x3	13.000000	мм.	Число	Термом	10.000000	30.000000
x4	0.200000	ч.о.	Число	Термом	0.000000	1.000000
x5	п		Число	Термом		
x6	0.000000	ч.о.	Число	Термом	0.000000	1.000000

Рис. 3.8. Вікно введення початкових даних

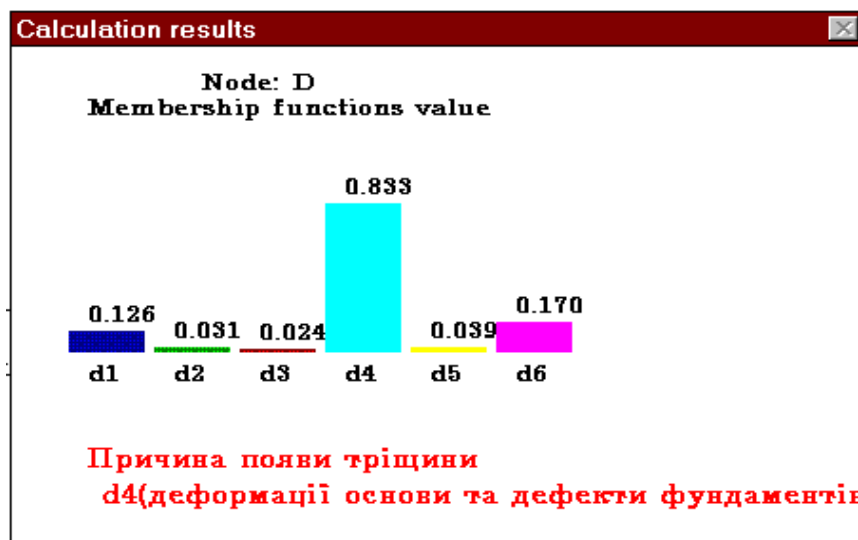


Рис. 3.9. Вікно результатів діагностування

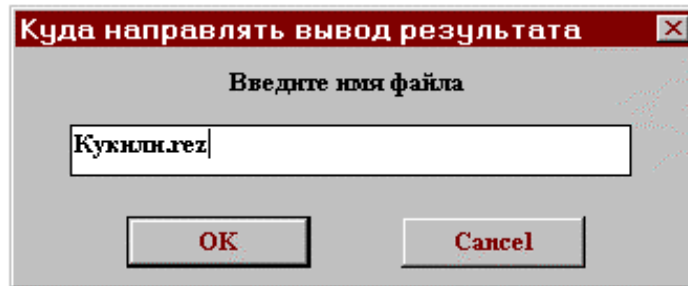


Рис. 3.10. Вікно протоколювання роботи системи

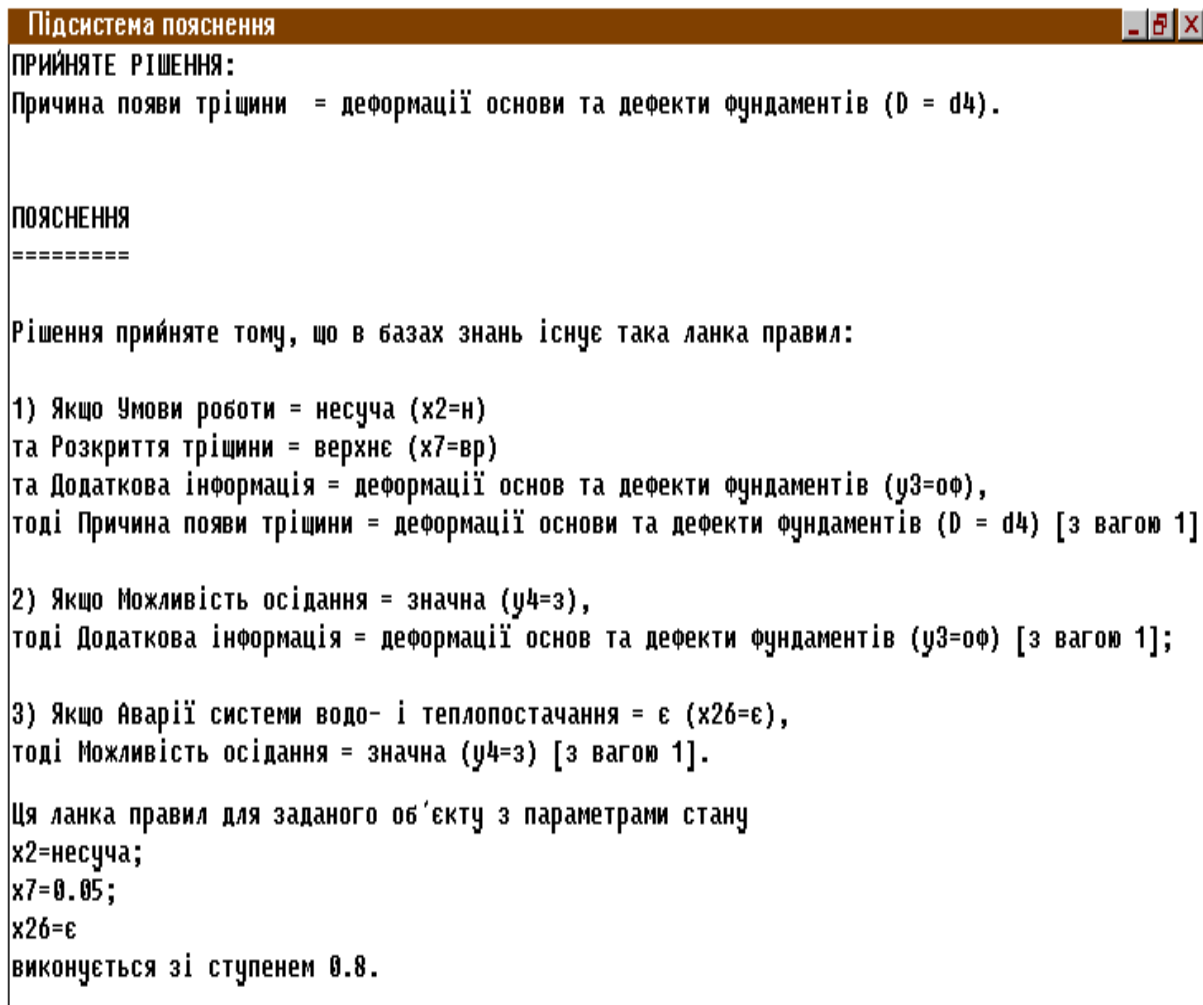


Рис. 3.11. Вікно пояснення прийнятого рішення

Система дозволяє будувати однофакторні залежності “частинний параметр стану – причина тріщини”, що забезпечує проведення аналізу чутливості прийнятого рішення до варіації початкових даних. Побудова таких залежностей здійснюється через пункт <Моделирование по одному параметра> меню <Моделирование>. На рис. 3.12 наведені результати аналізу чутливості при діагностуванні тріщини школи с. Кукули.

rez_x18 - Блокнот
Файл Правка Поиск ?

Моделирование по одному аргументу: x18

x18	d1	d2	d3	d4	d5	d6
0.100000	0.126	0.031	0.024	0.862	0.039	0.226
5.644444	0.126	0.031	0.024	0.833	0.039	0.226
11.188889	0.126	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
16.733333	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
22.277778	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
27.822222	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
33.366667	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
38.911111	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
44.455556	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146
50.000000	0.123	0.031	0.024	0.833	0.039	0.146

Значения остальных переменных

x1 = 0.000010
x2 = 0.000010
x3 = 13.000000

Рис. 3.12. Аналіз чутливості

Для формалізованого опису тріщини пропонується використовувати спеціально розроблений бланк, що заповнюється під час обстеження конструкції. Цей бланк наведено в додатку Б. Бланк складається з двох розділів. В першому розділі фіксується загальна інформація (назва об'єкта, розташування тріщини, прізвище спеціаліста, що виконує обстеження) та частинні параметри стану об'єкта, які необхідні для визначення причини виникнення тріщини. Значення частинного параметра стану може задаватися числом, термом або позначкою на шкалі "термометра". В другому розділі фіксуються результати діагностування тріщини, яке проводиться за допомогою запропонованої автоматизованої системи. Встановлення причини появи тріщини фактично зводиться до заповнення усіх граф бланку, яке пропонується проводити за такою методикою.

Крок 1. В графі «Об'єкт» записати повну назву об'єкта, що має тріщину, номер замовлення та назву будівлі.

Крок 2. В графі «Локалізація тріщини» вказати з необхідним рівнем деталізації місце розташування тріщини, наприклад, осі, між якими вона знаходиться.

Крок 3. В графі «Тип конструкції» визначити, до якого із шести запропонованих типів належить конструкція, що має тріщину.

Крок 4. В графі «Умови роботи» визначити як працює дана конструкція. Для цього необхідно обрати один з трьох термів: «несуча», «самонесуча», «ненесуча».

- Крок 5.* В графі «Товщина горизонтальних швів» задати значення цього параметра числом (від 10 до 30 мм), або за допомогою термів «нормальна» (до 15 мм), «перевищена» (від 15 до 20 мм) та «значно перевищена» (більше 20 мм).
- Крок 6.* В графі «Відхилення при заповненні швів» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає», «мало» та «багато». Цегляна кладка повинна володіти монолітністю, що забезпечується зчепленням цегли з розчином. Терму «мало» відповідає кладка без наскрізних пустот з обсягом незаповнення швів до 10%, терму «багато» відповідає кладка, що має наскрізні пустоти або коли обсяг незаповнення швів перевищує 10%.
- Крок 7.* В графі «Система перев'язки» задати значення цього параметра термами «непорушена» та «порушена». Під «непорушеною» системою перев'язки розуміється спосіб укладання цегли в рядах кладки, їх примикання один до одного та взаємне розташування у суміжних рядах, що забезпечує рівномірну передачу всього діючого на стіну навантаження на всі її перетини, або, іншими словами, які б забезпечили стійкість та міцність стіни, а також її захисні властивості по відношенню до атмосферного впливу, згідно з нормативними вимогами.
- Крок 8.* В графі «Непередбачені отвори, борозни, ніші» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». Ніші та борозни потрібно влаштовувати в процесі кладки стіни, тобто з відповідною перев'язкою стінок ніш з загальним масивом стіни. Видовбування отворів, ніш та борозен не допускається [8].
- Крок 9.* В графі «Дефекти армування» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає», «незначні» та «суттєві». Терму «незначні» відповідає кладка з одним типом дефекту, наприклад, перевищення нормативної відстані між сітками по висоті елемента; терму «суттєві» відповідає кладка з двома та більше типами дефектів. Найбільш поширеними дефектами армування є: 1) невстановлені анкерні в'язи на рівні перекриття кожного поверху або в кутах зовнішніх стін; 2) не заведені металеві в'язи, які з'єднують ділянки суміжних стін, в кожному стіну не менше як на 1 м, відраховуючи від внутрішнього кута; 3) перевищення нормативної відстані між сітками по висоті елемента (відстань не повинна перевищувати 400 мм); 4) зменшення товщини швів кладки армоцегляної конструкції (товщина швів повинна перевищувати товщину сітки не менше ніж на 4 мм).
- Крок 10.* В графі «Кривина конструкції» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». Викривлення стіни може спостерігатися, як місцеве, так і по всій профільній проекції конструкції.

- Крок 11.* В графі «Перевищення допустимого відхилення від вертикалі» задати значення цього параметра числом (в процентах) або за допомогою термів «немає» (біля 0%), «незначне» (до 20%) та «суттєве» (більше 20%). За нормами на один поверх похибка повинна бути не більш 10 мм, на всю будівлю – не більше 30 мм [11, 56].
- Крок 12.* В графах «Зволоження кладки», «Лущення кладки», «Вивітрювання кладки», «Вилуговування кладки», «Викришування кладки» задати значення відповідних параметрів за допомогою термів «немає», «незначне» та «суттєве». Терму «незначне» відповідає кладка, з площею відповідного дефекту до 5% від загальної площі конструкції, а терму «суттєве» – більше 5%.
- Крок 13.* В графі «Місцеположення тріщини» задати значення цього параметра шляхом вибору одного з восьми термів. Терм «через всю конструкцію» обирається, у випадку, коли тріщина проходить через усе поле конструкції. Терм «між стінами» обирається, коли тріщина розташована між поздовжньою і поперечною стінами, у місцях перепаду висот або по лінії прибудови нової будівлі. Терм «у місцях примикання» обирається, коли тріщина розташована у місці примикання до перекриття, підлоги, цоколя або у місці сполучення конструкцій. Терм «від монолітного включення» обирається, коли тріщина йде від монолітного пояса, перемички, балки тощо. Терм «на опорах» обирається, коли тріщина виходить з місця прикладання зосереджених навантажень (опорна частина колон, пілястр, простінків). Терми «у верхній частині» та «у нижній частині» обираються, коли тріщина розташована відповідно у верхній або нижній частині конструкції. Терм «на вільному полі» обирається в решті випадках.
- Крок 14.* В графі «Вид тріщини» задати кут нахилу тріщини до горизонту числовим значенням (в градусах) або за допомогою термів: «вертикальна», «коса» та «горизонтальна». Терму «вертикальна» відповідає тріщина, що має нахил до горизонту біля 90^0 , терму «горизонтальна» – тріщина, що має нахил до горизонту біля 0^0 .
- Крок 15.* В графі «Розкриття тріщини» задати тип розкриття за допомогою термів «верхнє», «рівномірне» та «нижнє». Терму «верхнє» відповідає тріщина, що затухає донизу, терму «нижнє» відповідає тріщина, що затухає догори.
- Крок 16.* В графі «Ширина тріщини» задати значення цього параметра числом (в міліметрах) або допомогою термів «волосна» (до 1 мм); «дрібна» (1 – 3 мм); «розвинута» (3 – 8 мм); «велика» (8 – 15 мм); «крупна» (більш 15 мм).
- Крок 17.* В графі «Довжина тріщини» задати значення цього параметра числом (в метрах) або за допомогою термів: «коротка» – до 2-х рядів кладки (0,15 – 0,18 м); «середня» – до 4-х рядів кладки (0,3 –

0,35 м); «довга» – до 8-ми рядів кладки (0,6 – 0,65 м); «дуже довга» – більше 8-ми рядів кладки (більше 0,65 м).

Крок 18. В графі «Наслідок пожежі» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є».

Крок 19. В графі «Інформація про землетруси, вибухи» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». Цей параметр стану враховує інформацію про наявність землетрусів у районі розташування будівлі, що діагностується, а також інформацію про вибухи як віддалені, так і всередині будинку.

Крок 20. В графі «Динамічне навантаження» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». Джерелами динамічних навантажень є будівельні роботи (забивання паль або шпунтових стінок копрами), рух транспорту по нерівних дорогах та коливання (вібрації) під час роботи обладнання [60].

Крок 21. В графі «Сколювання під перемичкою» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є».

Крок 22. В графі «Глибина тріщини» задати значення цього параметра за допомогою термів «одностороння» та «наскрізна».

Крок 23. В графі «Зсув підпірної стіни або стіни підвалу» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». Випадки зсуву підпірних стін, стін підвалу, окремо розташованих фундаментів, підземних галерей від бокового тиску ґрунту найчастіше мають місце в весною, коли пазухи, що засипані неуцільненим ґрунтом, насичуються водою або затоплюються розрідженим ґрунтом.

Крок 25. В графі «Аварії систем водо- та тепло- забезпечення» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». В результаті недбалості експлуатації систем водо- та тепло- забезпечення будинків, що експлуатуються, в них часто виникають аварійні ситуації, що як правило супроводжуються втратами води.

Крок 26. В графі «Наявність організованих водостоків, вимощення, вертикального планування» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає» та «є». Технічна експлуатація фундаментів та основ передбачає утримання в належному стані території поблизу будівлі. При цьому територія двора повинна мати ухил від будівлі не менше як 0,01 по напрямленню до водовідвідних лотків або водоприймачів зливневої каналізації. Вимощення та тротуари біля будівель повинні бути в справному стані [67, 68]. Відсутність вертикального планування будівельного майданчика та організованого поверхневого водовідводу викликає додаткове обводнення ґрунту, значною мірою сприяє здиманню основи.

Крок 27. В графі «Наявність слабких, просадочних ґрунтів, ґрунтів, що здимаються; територій, що підробляються; неоднорідного ґрунту

під спорудою» задати значення параметра за допомогою термів «немає», «невідомо» та «є».

Крок 28. В графі «Наявність води у підвалі» задати значення параметра за допомогою термів «немає» та «є». У підвальних приміщеннях необхідно підтримувати заданий температурно-вологісний режим. Особливо уважно слід оглядати інженерні мережі та комунікації [15, 49].

Крок 29. В графі «Наявність поблизу ємнісних споруд» задати значення цього параметра за допомогою термів «немає», «невідомо» та «є».

Крок 30. В графах «Об'єкти, що будуються впритул або зносяться» та «Зміщення балок, перемичок» задати значення параметрів за допомогою термів «немає» та «є».

Крок 31. В графі «Необхідність осадового шва» задати значення цього параметра за допомогою термів «непотрібен» та «потрібен». Необхідність улаштування осадового шва визначається згідно з будівельними нормами [67].

Крок 32. В графі «Наявність осадового шва» задати значення параметра за допомогою термів «немає», «є неякісний» та «є».

Крок 33. В графах «Невраховане раніше навантаження», «Механічні uszkodження, що зменшують розрахунковий переріз», «Обпирання балок, прогонів без відповідних конструктивних заходів» та «Недостатня величина обпирання балок, плит» задати значення параметрів за допомогою термів «немає» та «є».

Крок 34. В графі «Необхідність температурного шва» задати значення параметра за допомогою термів «непотрібен» та «потрібен». Необхідність улаштування осадового шва визначається згідно з будівельними нормами [67].

Крок 35. В графі «Наявність температурного шва» задати значення параметра за допомогою термів «немає», «є неякісний» та «є».

Крок 36. В графах «Виконання робіт в зимовий період» та «Застосування різнорідних матеріалів» задати значення параметрів за допомогою термів «немає», «невідомо» та «є».

Крок 37. Запустити автоматизовану систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень при діагностуванні тріщин цегляних конструкцій будівель.

Крок 38. Ввести в автоматизовану систему значення частинних параметрів стану та визначити причину виникнення тріщини.

Крок 39. Записати результати діагностування в архів та зафіксувати причину виникнення тріщини в графі «Комп'ютерне рішення».

Крок 40. Після перевірки зафіксувати дійсну причину появи тріщини в графі «Верифіковане рішення». Заповнення цієї графи дозволяє підтримувати зворотний зв'язок між розробниками та користувачами, необхідний для адаптації моделі діагностування на нові умови.

ПІСЛЯМОВА

В монографії запропоновано метод діагностування тріщин будівельних конструкцій на основі нечітких баз знань і генетичних алгоритмів. Автори сподіваються, що читач знайшов в книзі відповіді на такі питання:

- що таке діагностування тріщин?
- які переваги дає достовірне діагностування тріщин на ранніх етапах обстеження будівель?
- які особливості діагностування пошкоджень будівельних конструкцій?
- які кібернетичні методи можна застосовувати для встановлення причин появи тріщин в будівельних конструкціях?
- що таке нечітка множина, нечітка база знань, нечіткій висновок?
- які переваги застосувань нечітких систем в діагностуванні пошкоджень?
- як проектувати нечіткі діагностичні системи?
- як навчати нечіткі експертні діагностичні системи за експериментальними даними?

Описана в монографії автоматизована система встановлення причин появи тріщин в цегляних конструкцій будівель є одним з прикладів практичного застосування запропонованої теорії діагностування пошкоджень. Автори сподіваються, що монографія стане каталізатором синтезу нечітких систем діагностування для будівельних, механічних, електроенергетичних, радіоелектронних та інших технічних об'єктів. Першою ластівкою в майбутньому потоці таких розробок можна вважати нечітку модель оцінки технічного стану мосту та прогнозування його залишкового ресурсу [31].

ЛІТЕРАТУРА

1. Альберхт Р. Дефекты и повреждения строительных конструкций: Пер. с нем. — М.: Стройиздат, 1979. — 208 с.
2. Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. Сборник статей. / Под ред. Шишкина. — М.: Стройиздат, 1973. — 288 с.
3. Барашиков А.Я., Малышев А.Н. Оценка технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений. — К.: НМЦ Держнаглядохоронпраці України, 1998. — 232 с.
4. Баршдорф Д. Нейронные сети и нечеткая логика. Новые концепции для технической диагностики неисправностей // Приборы и системы управления. — 1996. — №2. — С.48-52.
5. Беккер В.А. Влияние дефектов каменной кладки на ее длительную прочность при сжатии // Изв. вузов. Строительство. — 1996. — №12. — С. 11-13.
6. Белозеров Е.И., Уваров П.Е., Пазин В.В., Меженский А.Н. Методология и технология проектирования безопасного жизнеобеспечения и сопровождения эксплуатации промышленно-строительных систем // Будівельні конструкції. — 1999. — Выпуск 51. — С. 40—47.
7. Бойко М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. — Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. — 336 с.
8. Бойко М.Д. Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений. Учеб. пособие для вузов. - Л.: Стройиздат, 1986. — 256 с.
9. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. — Рига: Зинатне, 1990. — 184 с.
10. Вахненко П.Ф. Каменные и армокаменные конструкции. — К.: Будівельник, 1990. — 149 с.
11. Вейц Р.И. Предупреждение аварий при строительстве зданий. — Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. — 144 с.
12. Горохов Е.В., Королев В.П., Мотовилин В.Л., Рухович И.П., Югов А.М. Обеспечение безаварийной работы конструкций зданий и сооружений в Донецкой области методами технической диагностики и паспортизации // Будівельні конструкції. — 1999. — Выпуск 51. — С. 135-143.
13. ГОСТ 20911—89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Издательство стандартов, 1990. — 13 с.

14. Гранев В.В., Гиндаян А.Г. Вопросы технического состояние зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. — 1999. — №5. — С. 47-49.
15. Грасник А., Хольцапфель В. Бездефектное строительство многоэтажных зданий. Ч. 1. Общестроительные работы: Пер. с нем. — М.: Стройиздат, 1980. — 256 с.
16. Гроздов В.Т. О разрушение стены от воздействия сезонного промерзания температуры наружного воздуха // Известие вузов. Строительство. — 1996. — №12. — С. 8-11.
17. Грунау Э.Б. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях. — М.: Стройиздат, 1980. — 215 с.
18. Давидсон М.Г., Далматов Б.И. Деформации зданий и меры их предупреждений. — Л.—М.: Госстройиздат, 1958. — 262 с.
19. Диагностика конструкций и инженерного оборудования жилых зданий. Матеріали семінару «Оцінка технічного стану, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель та споруд». — Київ, 1999. — С. 28-35.
20. Диагностика, обследование и оценка качества конструкций и систем промышленных и гражданских объектов при их реконструкции и эксплуатации. // Под. ред. А. Н. Субетто. — Л.: Знание, 1989. — 89 с.
21. Доорс Дж., Рейблейн А.Р., Вадера С. Пролог — язык программирования будущего: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1990. — 144 с.
22. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 511 с.
23. Дюк В., Самойленко А. Data mining: учебный курс. — СПб: Питер, 2001. — 368 с.
24. Еременюк П.Л., Еременюк И.П. Каменные и армокаменные конструкции. Киев: Вища школа, 1981. — 223 с.
25. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 167 с.
26. Износ зданий, диагностика и реконструкция. Учеб. пособие (курс лекций). — К.: Вища школа, 1998. — 188 с.
27. Ильин Н.А. Техническая экспертиза зданий поврежденных пожаром. — М.: Стройиздат, 1983. — 200 с.
28. Кательников Д.І. Розробка методу ідентифікації нелінійних об'єктів для прийняття рішень на базі нечіткої логіки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / НВК «Київський інститут автоматики». - К., 1998. - 16 с.
29. Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. М.: Прогресс, 1979. — 504 с.
30. Коллакот Р. Диагностика повреждений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 512 с.
31. Лантух-Лященко А.І. До розробки галузевої аналітичної експертної системи управління мостами // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво

- тво.– 2004.- Випуск 69 “Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення”. – С. 179-184.
32. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. — М.: Мир, 1991. — 568 с.
33. Лужин О.В., Горбунов И.А. Систематизация сбора информации по дефектам эксплуатируемых объектов и создание методов оценки отказов на основе экспертных систем // Изв. вузов. Строительство. — 1996. — №3. — С. 3—6.
34. Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. – Винница: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2002. — 145 с.
35. Методические указания по натурным обследованиям промышленных зданий, получивших разрушения в результате внешних воздействий. — М.: ЦНИИпромзданий, 1987. — 144 с.
36. Мокин Б.И., Грабко В.В., Динь Тхань Вьет Математические модели и информационно-измерительные системы для технической диагностики трансформаторных вводов. – Винница: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1997. – 130 с.
37. Обследование и испытание сооружений: Учеб. для вузов / О.В. Лужин, А.Б. Злочевский и др.; Под ред. О.В. Лужина. — М.: Стройиздат, 1987. — 263 с.
38. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. — М.: Радио и связь, 1981. — 286 с.
39. Основы технической диагностики. Кн.1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П.П. Пархоменко. — М.: Энергия, 1976. — 464 с.
40. Панкевич О.Д., Штовба С.Д. Модель на основі нечітких баз знань для діагностування тріщин цегляних конструкцій будівлі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — №5. — С. 14-21.
41. Панкевич О.Д., Штовба С.Д. Оцінка можливості дефектів фундаментів та основи при діагностуванні тріщин будівельних конструкцій // Будівельні конструкції. — 2000. — Випуск 53. Кн.2. — С. 176-181.
42. Панкевич О.Д. Экспертная система диагностики трещин кирпичных конструкций // Будівельні конструкції. — 2000. — Випуск 52. — С. 422-429.
43. Панкевич О.Д. Навчання нечіткої моделі діагностування тріщин цегляних конструкцій за допомогою генетичного алгоритму // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2001. - №4. - С. 37-41.
44. Панкевич О.Д., Маевская И.В. Автоматизация принятия решений при определении причин трещин кирпичных конструкций // Будівельні конструкції. — 2001. — Випуск 54. — С.528-534.
45. Панкевич О.Д. Розробка моделі та автоматизованої системи підтримки прийняття рішень при діагностуванні тріщин цегляних конструкцій бу-

- дівель: 05.13.12. Дис. ... канд. техн. наук / Вінницький державний технічний університет. – Вінниця, 2001.– 178 С.
46. Панкевич О.Д., Маевская И.В. Определение причин появления трещин кирпичных конструкций на основе нечетких баз знаний // Известия вузов: Строительство. – 2002.– №1-2, С.4-8.
 47. Панкевич О.Д., Штовба С.Д., Штовба Д.П. Диагностика причин трещин строительных конструкций на основе мягких вычислений // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво.– 2004.- Випуск 69 “Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення”. – С. 120-126.
 48. Положение по техническому обследованию жилых зданий ВСН—57—88(р). —М.: Стройиздат, 1991. — 64 с.
 49. Порывай Г.А. Техническая эксплуатация зданий. — М.: Стройиздат, 1990.—386 с.
 50. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01—83) / НИИОСП. — М.: Стройиздат, 1986. — 415 с.
 51. Почтаман Ю.М., Милов В.Ю. Нечеткая постановка задачи оптимального проектирования конструкций, воздействующих с агрессивными средами // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1990. — №11. — С. 7-11.
 52. Предотвращение поврежденных конструкций в жилищном строительстве. Том 4. Внутренние стены. Крыши. Полы: Пер. с нем. / Е. Шильд, Р. Освальд, Д. Роджер. — М.: Стройиздат, 1982. — 142 с.
 53. Предупреждение деформаций и аварий зданий и сооружений / А.И. Работников, А.А. Михайлов, Б.М. Кованев и др.; Под ред. В.А. Лисенко. — К.: Будівельник, 1984. — 120 с.
 54. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асан, Д. Ватада, С. Иван и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асан, М. Сугэно. — М.: Мир, 1993. — 368 с.
 55. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. Кн.1.: Пер. с англ. — М.: Мир. — 1986. — 320 с.
 56. Рекомендации по усилению каменных конструкций зданий и сооружений. — М.: Стройиздат, 1984. — 36 с.
 57. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам. — М.: ЦНИИПромзданий. ГОССТРОЯ СССР, 1989. — 112 с.
 58. Рекомендации по определению технического состояния ограждающих конструкций при реконструкции промзданий. — М.: Стройиздат, 1988. — 151 с.
 59. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промзданий и сооружений. — М.: НИИСК, 1989. — 65 с.
 60. Рибицки Р. Повреждение и дефекты строительных конструкций: Пер. с нем. — М.: Стройиздат, 1982. — 432 с.

61. Ройтман А.Г. Деформации и повреждение зданий. — М.: Стройиздат, 1987. — 160 с.
62. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике. — Винница: Континент—ПРИМ, 1996. — 132 с.
63. Ротштейн А.П., Кательников Д.И. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний // Кибернетика и системный анализ. — 1998. — №5. — С. 53-61.
64. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Винница: УНИВЕРСУМ—Вінниця, 1999. — 320 с.
65. Ротштейн А.П., Панкевич О.Д., Штовба С.Д. Принципы диагностики строительных конструкций на базе нечеткой логики // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. — 2000. — Вип.1(12). «Будівельні конструкції. Будівлі та споруди». — С. 150-153.
66. Сендерв Б.В., Барков Ю.В. Повреждение зданий и меры по их предотвращению. — М.: Знание, 1986. — 64 с.
67. СНиП II—22—81 Каменные и армокаменные конструкции. — М.: Стройиздат, 1983. — 40 с.
68. Соколов В.К. Реконструкция жилых зданий. — М.: Стройиздат, 1986. — 248 с.
69. Строительство и ремонт одноэтажных домов / М. Дедек, Д. Долань, В. Гаек и др. — М.: Стройиздат, 1981. — 285 с.
70. Тетиор А.Н. Обследование и испытание сооружений. — Киев: Вища школа, 1988. — 207 с.
71. Уткин В.С. Уткин Л.В. Экспертный метод определения физического износа зданий // Промышленное и гражданское строительство. — 2000. — №1. — С.48.
72. Физдель И.А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения 2-е изд. — М.: Стройиздат, 1987. — 336 с.
73. Финкель В.М. Трещина // Физика твердого тела. Энциклопедический словарь. — К., 1998. — Т.2. — С.343
74. Хило Е.Р., Попович Б.П. Усиление строительных конструкций. — Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1985. — 156 с.
75. Хэммонд Р. Аварии зданий и сооружений. Причины и уроки аварий современных сооружений различных типов: Пер.с англ. — М.: Госстройиздат, 1960. — 187 с.
76. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. — М.: Наука. — 1984. — 320 с.
77. Штовба С.Д., Панкевич О.Д. Проектирование нечетких классификаторов в системе MATLAB // Труды 2-й Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB», Москва. — 2004. — С. 1320-1335.

78. Югов А.М., Житенко Э.Н. Проблемы технической диагностики эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений // Будівельні конструкції. — 1999. — Выпуск 51. — С. 215-220.
79. Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей: последние достижения. — М.: Энергоатомиздат. — 1993. — 236 с.
80. Bernardini A., Modena C. Application of the Fuzzy Sets Theory to the Reliability Evaluation of Structural Systems. In Proc. of Inter. Symposium on Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. China, Guangdong.— 1987.— P.541-548.
81. Gen M., Cheng R. Genetic Algorithms and Engineering Design. — John Wiley & Sons, 1997. — 352 p.
82. Koza J. Genetic Programming - On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. — The MIT Press.— 1992.
83. Liu K.F.R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering.— vol. 18.— 2003.— P. 426-439.
84. Looney C. Pattern Recognition Using Neural Networks: Theory and Algorithms for Engineers and Scientists. — Oxford University Press, 1997. - 458 p.
85. Miller G.A. The Magic Number Seven Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information // Psychological Review. — 1956. — №63. — P. 81—97.
86. Molnarka G. Problems in Failure Analysis in Building Pathology // In Bulletin 2000 of Faculty of Architecture. Hungary: Technical University of Budapest. — 2000. — P. 129-142.
87. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. In "Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications" (Eds.: Zimmermann H.-J., Tselentis G., van Someren M., Dounias G.). Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2002, P. 401-412.
88. Rotshtein A. Design and Tuning of Fuzzy Rule - Based Systems for Medical Diagnosis. In "Fuzzy and Neuro - Fuzzy Systems in Medicine" (Eds.: H. Teodorescu and A. Kandel). — CRC Press, 1998. — P. 243-289.
89. Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. - 1965. - №8. - P. 338-353.
90. Zimmerman H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 3rd ed. — Kluwer Academic Publishers, 1996. — 435 p.

Додаток А. Параметри нечіткої моделі діагностування тріщин цегляних конструкцій

Таблиця А.1

Параметри функцій належностей нечітких термів

Параметр стану	Терми	Параметри функції належності			
		До навчання		Після навчання	
		b	c	b	c
1	2	3	4	5	6
X ₁	сг	0	0.1	0	1.46
	п	0.2	0.1	0.2	0.8
	пр	0.4	0.1	0.48	0.62
	пг	0.6	0.1	0.6	1.64
	пп	0.8	0.1	0.8	0.55
	сп	1	0.1	1	1.08
X ₂	нн	0	0.1	0	1.29
	сн	0.5	0.1	0.59	0.99
	н	1	0.1	1	0.52
X ₃	н	12.5	3	12	3.4
	п	17	3	15.6	3.03
	зп	25	4	25	4.01
X ₄	н	0	0.1	0	0.32
	м	0.5	0.2	0.48	0.2
	б	1	0.1	1	0.11
X ₅	нп	0	0.3	0	0.3
	п	1	0.3	1	0.3
X ₆	н	0	0.2	0	0.21
	є	1	0.2	1	0.08
X ₇	н	0	0.12	0	0.54
	нз	0.5	0.12	0.49	0.12
	с	1	0.12	1	0.12
X ₈	н	0	0.25	0	0.25
	є	1	0.25	1	0.6
X ₉	н	0	5	0	4.6
	нз	20	10	24.9	10.3
	с	200	75	200	74.7
X ₁₀	н	0	0.12	0	0.7
	нз	0.5	0.12	0.89	0.17
	с	1	0.12	1	0.22
X ₁₁	н	0	0.12	0	0.13
	нз	0.5	0.12	0.5	0.29
	с	1	0.12	1	0.52

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6
X ₁₂	н	0	0.12	0	0.13
	нз	0.5	0.12	0.71	0.47
	с	1	0.12	1	0.37
X ₁₃	н	0	0.12	0	0.9
	нз	0.5	0.12	0.47	0.25
	с	1	0.12	1	0.13
X ₁₄	н	0	0.12	0	0.16
	нз	0.5	0.12	0.51	0.13
	с	1	0.12	1	0.13
X ₁₅	чв	0	0.08	0	0.38
	мс	0.145	0.08	0.21	0.3
	мп	0.29	0.08	0.26	0.32
	мв	0.435	0.08	0.32	0.13
	оп	0.58	0.08	0.6	0.1
	вч	0.725	0.08	0.85	0.43
	вп	0.87	0.08	0.95	0.14
	нч	1	0.08	1	0.21
X ₁₆	г	0	10	0	32.8
	к	45	15	45	15.5
	в	90	10	90	36.4
X ₁₇	вд	0	0.1	0	0.35
	рр	0.5	0.2	0.51	0.66
	нр	1	0.1	1	0.76
X ₁₈	вол	0	1	0	1.2
	др	2	2	1.7	4.1
	роз	5.5	2	5.4	3.7
	вел	12	4	12	2.3
	кр	35	10	35	12.6
X ₁₉	к	0	0.1	0	0.58
	сд	0.25	0.2	0.23	0.3
	д	0.5	0.3	0.51	0.34
	дд	2	0.8	2	0.73
X ₂₀	н	0	0.1	0	0.11
	с	1	0.1	1	0.25
X ₂₁	н	0	0.15	0	0.17
	с	1	0.15	1	0.16
X ₂₂	н	0	0.1	0	0.11
	с	1	0.1	1	0.18
X ₂₃	н	0	0.15	0	0.15
	с	1	0.15	1	0.16
X ₂₄	од	0	0.1	0	0.28
	нс	1	0.1	1	0.29

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6
X ₂₅	н	0	0.12	0	0.14
	є	1	0.12	1	0.65
X ₂₆	н	0	0.15	0	0.6
	є	1	0.15	1	0.16
X ₂₇	є	0	0.1	0	0.18
	н	1	0.1	1	0.24
X ₂₈	н	0	0.2	0	0.21
	нв	0.5	0.2	0.69	0.22
	є	1	0.2	1	0.71
X ₂₉	н	0	0.15	0	0.59
	є		0.15	1	0.15
X ₃₀	н	0	0.1	0	0.19
	нв	0.5	0.1	0.45	0.11
	є	1	0.1	1	0.46
X ₃₁	н	0	0.12	0	0.14
	є	1	0.12	1	0.53
X ₃₂	н	0	0.2	0	0.34
	є	1	0.2	1	0.35
X ₃₃	нп	0	0.15	0	0.16
	п	1	0.15	1	0.25
X ₃₄	н	0	0.2	0	0.18
	єн	0.5	0.2	0.41	0.2
	є	1	0.2	1	0.31
X ₃₅	н	0	0.15	0	0.22
	є	1	0.15	1	0.16
X ₃₆	н	0	0.15	0	0.18
	є	1	0.15	1	0.32
X ₃₇	н	0	0.15	0	0.19
	є	1	0.15	1	0.16
X ₃₈	н	0	0.15	0	0.29
	є	1	0.15	1	0.18
X ₃₉	нп	0	0.2	0	0.15
	п	1	0.2	1	0.21
X ₄₀	н	0	0.1	0	0.23
	єн	0.5	0.2	0.5	0.22
	є	1	0.1	1	0.1
X ₄₁	н	0	0.1	0	0.11
	нв	0.5	0.15	0.14	0.7
	є	1	0.1	1	0.1
X ₄₂	н	0	0.1	0	0.35
	нв	0.5	0.17	0.51	0.33
	є	1	0.1	1	0.1

Таблиця А.2

Вагові коефіцієнти правил після навчання

Порядковий номер правила	Ваговий коефіцієнт	Порядковий номер правила	Ваговий коефіцієнт
1	0.778	41	0.954
2	0.839	42	0.199
3	0.43	43	0.77
4	0.902	44	0.88
5	0.924	45	0.659
6	0.865	46	0.319
7	0.995	47	0.998
8	0.495	48	0.976
9	0.993	49	0.572
10	0.852	50	1
11	0.952	51	0.952
12	0.998	52	0.995
13	0.996	53	0.774
14	0.997	54	0.987
15	0.957	55	0.763
16	0.572	56	0.628
17	0.968	57	0.763
18	0.828	58	0.628
19	0.798	59	0.611
20	0.47	60	0.57
21	0.996	61	0.991
22	0.785	62	0.917
23	0.916	63	0.444
24	0.951	64	0.634
25	0.298	65	0.995
26	0.998	66	0.959
27	0.699	67	0.541
28	0.218	68	0.688
29	0.397	69	0.992
30	0.612	70	0.993
31	0.261	71	0.972
32	0.945	72	0.808
33	0.993	73	0.983
34	0.953	74	0.68
35	0.846	75	0.82
36	0.903	76	0.695
37	0.99	77	0.423
38	0.991	78	0.806
39	0.896	79	1
40	0.972	80	0.903

Продовження табл. А.2

Порядковий номер правила	Ваговий коефіцієнт	Порядковий номер правила	Ваговий коефіцієнт
81	0.878	117	1
82	1	118	0.945
83	0.732	119	0.197
84	0.923	120	0.999
85	0.974	121	0.991
86	0.508	122	0.86
87	0.932	123	0.825
88	1	124	0.952
89	0.981	125	0.814
90	0.979	126	0.746
91	0.996	127	0.985
92	0.602	128	0.589
93	0.73	129	0.715
94	0.707	130	0.852
95	0.805	131	0.939
96	1	132	1
97	0.756	133	1
98	1	134	1
99	1	135	0.792
100	0.998	136	1
101	0.941	137	0.995
102	1	138	0.705
103	0.998	139	0.976
104	1	140	0.997
105	0.984	141	1
106	0.594	142	1
107	0.801	143	1
108	0.948	144	1
109	1	145	0.858
110	0.936	146	0.909
111	1	147	0.638
112	1	148	1
113	0.873	149	1
114	0.167	150	0.957
115	0.927	151	0.753
116	0.441		

Додаток Б. Бланк обліку та діагностування тріщини

Об'єкт									№	□□□
Локалізація тріщини										
X ₁	Тип конструкції	Стіна глуха | Стіна з пілястром | Простінок, стовп | Перегородка глуха | Перегородка з прорізом | Стіна з прорізом								
X ₂	Умови роботи	Ненесуча			Самонесуча			Несуча		
X ₃	Товщина горизонтальних швів	Нормальна			Перевищена			Значно перевищена		
		10			□□ мм			30		
X ₄	Відхилення при заповненні швів	Немає			Мало			Багато		
		0			□□□			1		
X ₅	Система перев'язки	Непорушена				Порушена				
		0				□□□				
X ₆	Непередбачені отвори, борозни, ніші	Немає				Є				
		0				□□□				
X ₇	Дефекти армування	Немає			Незначні			Суттєві		
		0			□□□			1		
X ₈	Кривина конструкції	Немає				Є				
		0				□□□				
X ₉	Перевищення допустимого відхилення від вертикалі	Немає		Незначне		Суттєве				
		0		□□□ %		200				
X ₁₀	Зволоження кладки	Немає			Незначне			Суттєве		
		0			□□□			1		
X ₁₁	Лущення кладки	Немає			Незначне			Суттєве		
		0			□□□			1		
X ₁₂	Вивітрювання кладки	Немає			Незначне			Суттєве		
		0			□□□			1		
X ₁₃	Вилуговування кладки	Немає			Незначне			Суттєве		
		0			□□□			1		
X ₁₄	Викришування кладки	Немає			Незначне			Суттєве		
		0			□□□			1		
X ₁₅	Місцеположення тріщини	Через всю конструкцію	Між стінами	У місцях примикання	Від монолітного включення	На опорах	Верхня частина	Вільне поле	Нижня частина	
X ₁₆	Вид тріщини	Горизонтальна			Коса				Вертикальна	
		0			□□ градусів				90	
X ₁₇	Розкриття тріщини	Верхнє			Рівномірне, всередині			Нижнє		
		0			□□□			1		
X ₁₈	Ширина тріщини	Волосна	Дрібна	Розвинута	Велика	Крупна				
		0.1		□□.□ мм		50				
X ₁₉	Довжина тріщини	Коротка	Середня	Довга	Дуже довга					
		0.1		□.□ м		4				
X ₂₀	Наслідок пожежі	Немає				Є				
		0				□□□				
X ₂₁	Інформація про землетруси, вибухи	Немає				Є				
		0				□□□				
X ₂₂	Динамічне навантаження	Немає				Є				
		0				□□□				
X ₂₃	Сколювання під перемичкою	Немає				Є				
		0				□□□				
X ₂₄	Глибина тріщини	Одностороння				Наскрізна				
		0				□□□				

Діагностування тріщини цегляної конструкції. Лист 1

X ₂₅	Зсув підпірної стіни або стіни підвалу	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₂₆	Аварії систем водота теплозабезпечення	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₂₇	Організовані водостоків, вертикалі планування, вимощення	Є		Немає			
		0	□.□□	1			
X ₂₈	Слабкі, просадочні ґрунти, територія, що підроблюється	Немає		Невідомо		Є	
		0	□.□□	1			
X ₂₉	Вода у підвалі	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₀	Наявність поблизу смісних споруд	Немає		Невідомо		Є	
		0	□.□□	1			
X ₃₁	Об'єкти, що будуються впритул або зносяться	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₂	Зміщення балок, перемичок	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₃	Необхідність осадового шва	Непотрібний		Потрібний			
		0	□.□□	1			
X ₃₄	Наявність осадового шва	Немає		Є неякісний		Є	
		0	□.□□	1			
X ₃₅	Невраховані раніше навантаження	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₆	Механічні ушкодження, що зменшують розрахунковий переріз	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₇	Обпирання балок, прогонів без відповідних конструкт. заходів	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₈	Недостатня величина обпирання балок, плит	Немає		Є			
		0	□.□□	1			
X ₃₉	Необхідність температурного шва	Непотрібний		Потрібний			
		0	□.□□	1			
X ₄₀	Наявність температурного шва	Немає		Є неякісний		Є	
		0	□.□□	1			
X ₄₁	Виконання робіт зимою	Немає		Невідомо		Є	
		0	□.□□	1			
X ₄₂	Застосування різно-рідних матеріалів	Немає		Невідомо		Є	
		0	□.□□	1			

□□.□□.□□□□ _____
 Дата обстеження Підпис Прізвище та ініціали

Результати діагностування та верифікації

Комп'ютерне рішення	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	Оператор _____
Верифіковане рішення	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	Перевірив _____

d₁ - перевантаження статичне; d₄ - деформація основи та дефекти фундаментів;
 d₂ - перевантаження динамічне; d₅ - температурні деформації;
 d₃ - перевантаження особливе; d₆ - порушення технології буд. процесів або неврахування властивостей матеріалів

Діагностування тріщини цегляної конструкції. Лист 2