

О. О. Горюн
І. В. Коц
О. Д. Панкевич
В. В. Панкевич

АНАЛІЗ ПЛИВУ ФАКТОРІВ НА НАДІЙНІСТЬ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

У статті представлені результати проведеного аналітичного огляду факторів надійності сучасного устаткування для гідроімпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів спеціальними просочувальними складами. Об'єктом дослідження є обладнання для обробки будівельних матеріалів шляхом імпрегнування. Такі установки знайшли своє використання у будівельній галузі і дозволяють значно покращити характеристики будівельних матеріалів. Ефективна робота, яка передбачає забезпечення якісного відтворення усіх технологічних операцій згідно заданих параметрів, вимагає застосування специфічного обладнання, яке у ході експлуатації потребує своєчасного технічного обслуговування, проведення регламентних ремонтних робіт та інших заходів, пов'язаних із підтримкою його нормального функціонування. Прогнозування надійності устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів є необхідним елементом його проектування. Для побудови моделі оцінювання надійності імпрегнатора авторами були використані методи нечіткої логіки. Тонке налаштування моделі передбачає використання апарату генетичних алгоритмів, що забезпечить результат в залежності від вибірки. В ході моделювання авторами було проаналізовано та задано критерії, що мають вагомий вплив на надійність і якісну роботу апаратів, саме: проєктні, монтажні та експлуатаційні фактори, які є характерними для даного обладнання. Зокрема, досліджено вплив конструктивних особливостей, якості монтажу, умов експлуатації та технічного обслуговування на тривалість безаварійної роботи устаткування. Обґрунтовано актуальність використання теорії нечітких лінійних змінних для оцінки надійності роботи устаткування для виготовлення будівельних виробів. В рамках дослідження побудовано дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків, що дозволяє структуровано оцінити взаємозалежності між різними факторами. Сформовано експертні бази знань та отримано нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних. Застосування методів нечіткої логіки дає можливість автоматично та в реальному часі проводити моніторинг, визначати і діагностувати причини відхилень у фактичних характеристиках під час роботи обладнання. Це дозволяє більш точно моделювати та прогнозувати надійність устаткування в умовах невизначеності, підвищуючи ефективність його експлуатації та технічного обслуговування, що створює передумови для підвищення ефективності експлуатації обладнання для імпульсного імпрегнування шляхом більш повного використання його ресурсу.

Ключові слова: оцінювання надійності; фактори та критерії надійності; імпрегнування капілярно-пористих тіл; математичне моделювання; будівельні матеріали; устаткування для виготовлення будівельних виробів; методи нечіткої логіки.

Вступ

Розвиток технологій виготовлення мінеральних та органічних будівельних виробів шляхом імпрегнування просочувальними складами створює передумови для вдосконалення обладнання для реалізації даних технологій, а відповідно і створення нових конструктивних рішень. В розрізі виготовлення будівельних матеріалів способом імпрегнування досить ефективною є технологія виробництва будівельної продукції шляхом імпульсної гідротермічної обробки зразків, яка полягає в глибокому проникненні рідини в капілярно-пористу структуру матеріалів (Hogiun, 2024). Опираючись на новостворені конструктивні схеми обладнання для реалізації даної технології неможливо заперечити актуальність створення математичної моделі для оцінки надійності роботи нового устаткування. Таким чином, вирішення питань надійності обладнання для імпульсного імпрегнування потребує розробки більш стійких матеріалів для його виготовлення, запровадження моніторингу технічного стану в режимі реального часу, застосування нечіткої логіки для прогнозування відмов, а також оптимізації параметрів імпульсного режиму роботи для мінімізації зношення компонентів.

Щоб підвищити надійність і функціональність обладнання для гідроімпульсного просочування, важливо вирішити поточні проблеми як у розробці будівельних матеріалів, так і в конструкції обладнання. Дослідження гідротермічного імпрегнування демонструють багатообіцяючі досягнення, особливо з використанням рідких композицій на основі сполук кремнію, сірки, полімерних смол, фосфату амонію, рідкого калієвого та натрієвого скла тощо (Jo et al, 2023), (Zarzucla et al, 2023), (Trykoz et al, 2024). Ці дослідження зосереджені на підвищенні довговічності матеріалу та стійкості до агресивних впливів, що має вирішальне значення для середовищ із

високим навантаженням, які часто зустрічаються в будівництві. Процеси пов'язані з конструюванням викликають необхідність прогнозування імовірності якісної роботи нових конструкцій апаратів даної галузі. Подальше моделювання та оцінка надійності цих технологій пропонують шляхи для ефективної, стійкої до дефектів роботи та створення інноваційних рішень устаткування.

Проблематика надійності імпульсного обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів є важливим питанням, оскільки стабільна робота таких установок напряму впливає на якість обробки, економічну ефективність та безпеку експлуатації. Основні проблеми пов'язані з високим навантаженням на конструктивні елементи внаслідок імпульсного характеру роботи, частого переходу від стану спокою до пікових навантажень, а також впливом середовища просочувальних складів. Це може призводити до швидкого виходу з ладу компонентів, таких як насоси, клапани, трубопроводи та ущільнювачі, зумовлює корозію, зниження герметичності та часті відмови.

Прогнозування безвідмовної роботи розглядуваного обладнання для гідроімпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів (Kots & Horiun, 2020) може базуватись на математичній моделі оцінювання його надійності. Надійність устаткування – це властивість виконувати задані функції, зберігаючи в часі встановлені експлуатаційні показники в необхідних межах, відповідних заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування.

Метою дослідження є визначення впливу факторів на оцінювання надійності устаткування для гідроімпульсного імпрегнування будівельних виробів спеціальними рідинами. Це передбачає встановлення ієрархічних зв'язків між факторами, використання лінгвістичних змінних для оцінки кількісних та якісних ознак, формування експертних баз знань та розробку нечітких логічних рівнянь для побудови функцій належності змінних.

Сьогодні існує широкий вибір способів моделювання оцінювання надійності. Серед традиційних методів оцінювання надійності та прогнозування стану можна виділити такі, що знайшли своє застосування стосовно технологій та інформаційних систем (Fang et al, 2024) і такі, що є більш поширеними щодо обладнання (Soe & Htet, 2024).

В контексті прогнозування надійності роботи обладнання набули популярності імовірнісні моделі (Mozafari, 2023), (Zheng & Yu, 2024), які використовують дані про час відмов для прогнозування життєвого циклу та визначення ймовірності безвідмовної роботи у майбутньому. Побудова фізичних чи симуляційних моделей (Xuegang, 2015) дозволяє оцінювати вплив умов експлуатації та режимів роботи на надійність. Однак розробка фізичних моделей потребує значних ресурсів та часу, а симуляції вимагають потужних обчислювальних ресурсів, причому врахування реальних умов при створенні моделі симуляції, може бути надто складним, що знижує імовірність побудови точної моделі. Основні недоліки імовірнісних моделей та побудова фізичних і симуляційних моделей у порівнянні полягають у їх обмеженій здатності враховувати неповну та нечітку інформацію. Імовірнісні моделі потребують значного обсягу даних для точної оцінки ймовірностей, тоді як методи математичного моделювання вимагають точних формулювань і параметрів, що може бути складним для складних або змінних систем. Нечітка логіка краще працює з невизначеністю та спрощує моделювання в складних умовах.

Відомим методом є оцінювання надійності та прогнозування малими вибірками, розглянутий у роботі Dui, Dong & Tao (2023), який дозволяє отримати висновки навіть за обмеженої кількості даних, що є корисним для нових або рідкісних систем, де накопичення великої вибірки є проблематичним. Проте результати, отримані з використанням такого методу, можуть мати високу невизначеність і низьку точність, а також бути менш надійними у складних умовах, коли виникає потреба у широкому спектрі даних для достовірності.

Матеріали та методи

Методи нечіткої логіки мають, використовувані у роботах (Ratushnyak, Lyaluk, & Horiun, 2022), (Ratushnyak & Pankevich, 2023) та (Shtovba & Pankevich, 2011) мають кілька переваг у моделюванні оцінювання надійності устаткування. Вони дозволяють враховувати неповну або нечітку інформацію, характерну для складних систем з великою кількістю змінних. Нечітка логіка забезпечує моделювання ситуацій з нечіткими або неповними даними, дозволяючи охопити як кількісні, так і якісні характеристики. Це стає особливо важливим для систем з різними факторами впливу та змінними режимами роботи, де класичні імовірнісні моделі можуть бути менш ефективними через обмеження у точності даних та складність обробки неповної інформації. Крім того, можуть забезпечувати роботу зі складними зв'язками між факторами без потреби в точних математичних моделях. Однією з основних переваг є те, що методи нечіткої логіки легко адаптуються до реальних умов і змінних робочих середовищ, що зменшує потребу в дорогих та

трудомістких корекціях моделі. Це робить нечітку логіку особливо корисною для моніторингу та діагностики у режимі реального часу, що є складнішим для традиційних моделей. Вибір методу нечіткої логіки для проведення аналізу надійності обладнання є обґрунтованим, оскільки ці методи дозволяють враховувати невизначеності, притаманні експлуатаційним умовам.

Види відмов, які можуть виникнути під час експлуатації гідроімпульсного обладнання: раптові – аварії, які неможливо передбачити; поступові, що обумовлені зносом, корозією та іншими факторами, які можна передбачити, змодельовати їхній вплив і запобігти виникненню таких відмов.

Фактори, що впливають на надійність устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних виробів: проєктні рішення, роботи по монтажу і встановленню імпрегнатора, експлуатаційні фактори. Надійність і довговічність устаткування можна бути підвищити на стадії проєктування, тобто під час наукових досліджень, конструювання, розрахунків і проєктних розробок. Фактори надійності обладнання для гідроімпульсного імпрегнування будівельних матеріалів наведено на рис. 1.

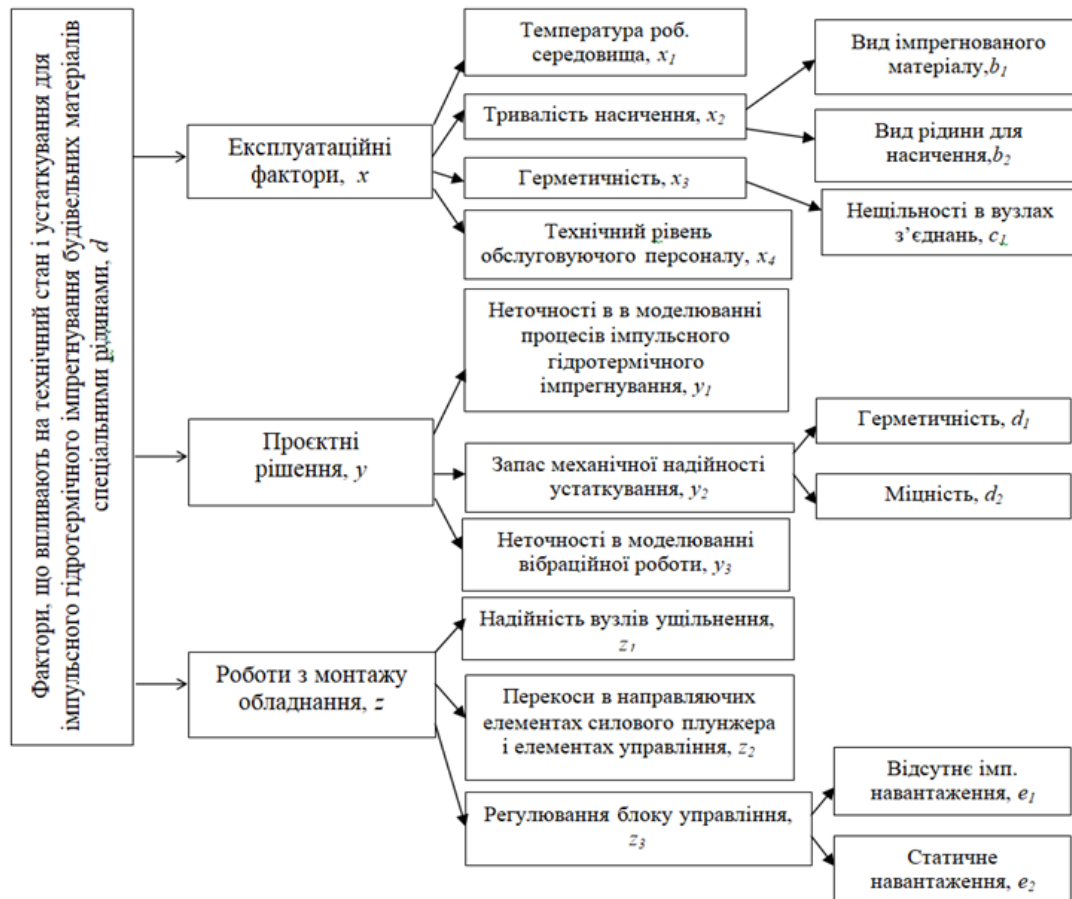


Рисунок 1 – Класифікація факторів, що впливають на технічний стан устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів

Вибір проєктних, монтажних та експлуатаційних факторів як ключових чинників для моделювання надійності обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів обґрунтовується тим, що кожен із них визначає можливі причини відмов системи. Проєктні рішення впливають на базову якість і стійкість конструкції до навантажень. Монтаж та встановлення впливають на правильність роботи та початковий рівень зносу компонентів. Експлуатаційні фактори враховують режим навантаження, який може призводити до зношування або відмов, що можуть виникнути у ході роботи обладнання.

Для отримання результатів моделювання необхідно скласти на основі експертної бази знань і термів функції належності базу нечітких логічних рівнянь. Для створення експериментально-модельної системи багатофакторного аналізу впливу прийнятих факторів на надійність роботи розглянутого устаткування, які характеризуються лінгвістичними та якісними термами, використано теорію нечітких та лінгвістичних змінних (Subach & Mykytiuk, 2023), (Abdelghafour et al, 2024).

Проєктні фактори впливу на надійність обладнання для імпрегнування на системному рівні, як лінгвістичну змінну, можна представити у вигляді залежності:

$$Y = f_y(X_1, X_2, X_3), \quad (1)$$

де X_1 – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує експлуатаційні фактори; X_2 – ЛЗ, що описує проєктні параметри; X_3 – ЛЗ, що описує фактори, які враховують роботи з монтажу обладнання.

Лінгвістичну змінну, що описує експлуатаційні параметри, можна подати виразом:

$$X_1 = f_{X_1}(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}), \quad (2)$$

де X_{11} – ЛЗ «температура робочого середовища»; X_{12} – ЛЗ «тривалість імпрегнування»; X_{13} – ЛЗ «герметичність робочої камери»; X_{14} – ЛЗ «технічний рівень обслуговуючого персоналу».

Лінгвістичну змінну, що описує параметри проєктних рішень, можна представити в такому вигляді:

$$X_2 = f_{X_2}(X_{21}, X_{22}, X_{23}), \quad (3)$$

де X_{21} – ЛЗ «надійність вузлів ущільнення»; X_{22} – ЛЗ «неточності в моделюванні процесів імпульсного гідротермічного імпрегнування»; X_{23} – ЛЗ «неточності в моделюванні вібраційної роботи».

Лінгвістична змінна, що описує фактори робіт з монтажу обладнання, може бути подана співвідношенням:

$$X_3 = f_{X_3}(X_{31}, X_{32}, X_{33}), \quad (4)$$

де X_{31} – ЛЗ «стан антикорозійного покриття»; X_{32} – ЛЗ «перекуси в направляючих елементах силового плунжера і елементах управління»; X_{33} – ЛЗ «регулювання пружини».

Всі фактори впливу, що впливають на технічний стан устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних виробів розглядаються як лінгвістичні змінні, що задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами. Якісний нечіткий терм є лінгвістичною змінною, значення якої виражається словом (Qiyas, Abdullah, & Muneeza, 2021), (Kristić & Žuškin, 2024). За нечіткі терми для оцінювання лінгвістичних змінних в співвідношеннях прийняті кількісні вирази «низька» (Н), «середня» (С) та «висока» (В). Використання нечітких термів дозволяє побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв'язки між вхідними та вихідними змінними. Поєднання експертних оцінок з методами нечіткої логіки може забезпечити гнучкий підхід для визначення вагомості факторів надійності обладнання для імпульсного імпрегнування. Такий підхід дозволяє враховувати неточні або суб'єктивні дані, які часто супроводжують реальні експлуатаційні умови. В табл. 1 наведено лінгвістичну оцінку змінних параметрів розглядуваного устаткування. Формування термів для лінгвістичних змінних проводилося з урахуванням експертних оцінок, подібно до (Sharma et al, 2024), (Krashenin, Yakovlev & Golovko, 2023), (Shved, 2024) і проводилося у кілька етапів. Передбачалося урахування зібраних даних оцінювання експертів, які оцінювали кожен фактор, використовуючи задану лінгвістичну шкалу. Було проведено конвертацію лінгвістичних оцінок у нечіткі числа, тобто кожне вербальне значення переводилося у числові інтервали за допомогою функцій належності.

Таблиця 1

Лінгвістична оцінка змінних параметрів устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів

Параметри	Позначення лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
1	2	3	4
Експлуатаційні	X_{11} – температура роб. середовища	50...130 °C	низька, середня, висока
	X_{12} – тривалість імпрегнування	120...240 хв	низька, середня, висока
	X_{13} – герметичність	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
	X_{14} – техн. рівень обслуговуючого персоналу	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока

Продовж. таблиці 1			
1	2	3	4
Проектні	X_{21} – неточності в моделюванні процесів імпульсного гідротермічно-го імпрегнування	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
	X_{22} – запас механічної надійності	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
	X_{23} – неточності в моделюванні вібраційної роботи	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
Монтажні	X_{31} – надійність вузлів ущільнення	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
	X_{32} – перекося в направляючих елементах силового плунжера і елементах управління	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
	X_{33} – регулювання блоку управління	1...5 умовних одиниць	низька, середня, висока

Результати та обговорення

За результатами сукупності параметрів, що характеризують фактори впливу на технічний стан устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів, що представлені залежностями (1)...(4), подібно (Povhan, 2020), (Uryadnikova, 2024), (Ratushnyak & Pankevich, 2020) до було побудовано дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків між визначеними кількісними та якісними параметрами матеріалів (рис. 2).

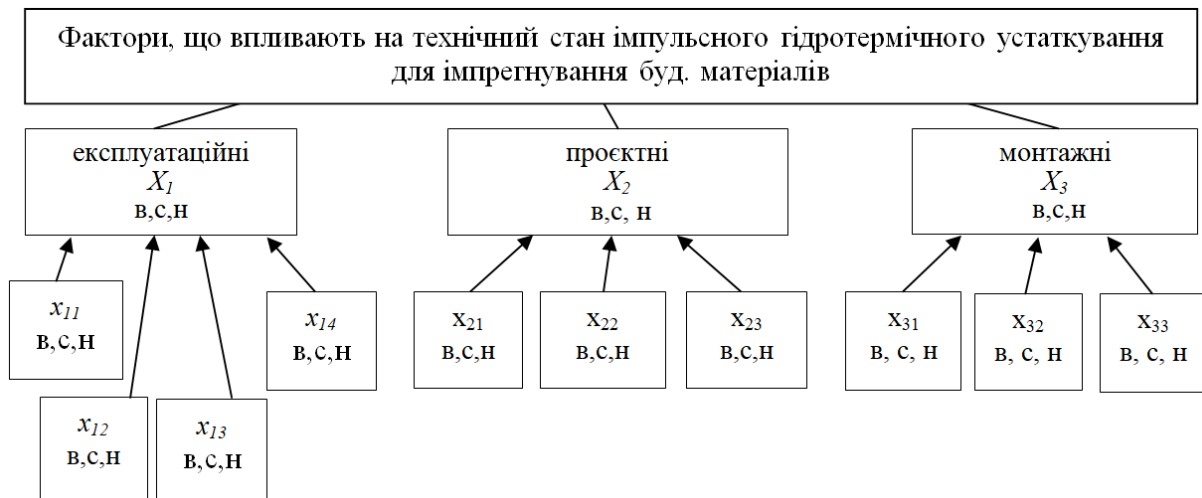


Рисунок 2 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на технічний стан обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів

Корінь дерева логічних висновків, як інтегральний показник дозволяє на експертному рівні здійснювати інтелектуальну підтримку щодо оцінки технічного стану устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів. Виконана формалізація та ієрархічна класифікація параметрів оцінки технічного стану обладнання для імпульсного насичення будівельних виробів дозволяє побудувати функції належності нечітких оцінок впливу параметрів на прийняття проектного рішення. Для отримання результатів моделювання сформуємо, на основі експертної бази знань і термів функції належності, базу нечітких логічних рівнянь, при цьому будемо використовувати операції $\wedge$ (I-min) та $\vee$ (АБО-max) (Xu et al, 2024). В табл. 2 приведено базу знань термів на системному рівні.

Таблиця 2

Експертна база знань термів на системному рівні залежності 1(x)

Якщо			то
Вхідні змінні			Вихідна змінна
X_1	X_2	X_3	x
1	2	3	4
в	в	в	в
в	с	в	
в	в	с	
в	в	в	
с	в	в	
с	в	с	с
с	с	в	
в	с	с	
с	с	с	
в	с	н	
в	н	с	с
н	с	в	
с	н	в	
с	в	н	
н	в	с	
с	с	н	н
н	с	с	
с	н	с	
н	н	с	
с	н	н	
н	с	н	
н	н	н	
в	н	н	
н	в	н	
н	н	в	
н	н	в	

У табл. 3 відображено дані бази знань якісних термів для експлуатаційних параметрів.

Таблиця 3

Експертна база знань якісних термів для експлуатаційних параметрів (x1)

Якщо				то
Вхідні змінні				Вихідна змінна
X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	x_1
в	в	в	в	в
в	с	в	в	
в	в	с	в	
в	в	в	с	
с	в	в	в	
в	в	с	с	с
с	с	в	в	
в	с	с	в	
с	в	в	с	
с	в	с	в	
в	с	в	с	
в	с	с	с	
с	в	с	с	
с	с	в	с	
с	с	с	в	
н	в	в	в	
в	н	в	в	
в	в	н	в	
в	в	в	н	
в	н	н	в	
в	в	н	н	
н	н	в	в	
в	н	в	н	

H	B	H	B	
B	B	C	H	
B	B	H	C	
C	B	B	H	
H	C	B	B	
B	C	H	B	
H	B	C	B	
B	H	B	C	
B	H	C	B	
C	H	B	B	
B	H	H	C	
C	B	H	H	
H	C	B	H	H
H	H	C	B	
H	C	B	C	
B	H	C	H	
C	C	H	H	
H	C	C	H	
H	C	H	C	
C	H	C	H	
C	H	H	C	
H	C	C	C	
C	H	C	C	
H	H	C	C	
C	H	H	H	
H	C	H	H	
H	H	H	H	

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних табл. 2 по відповідному терму:

$$\begin{aligned} \mu_h(x) = & \mu_h(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \mu_h(x_3) \vee \mu_h(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \mu_h(x_3) \vee \mu_h(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_h(x_3) \vee \mu_h(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \mu_h(x_3) \vee \mu_h(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_h(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_h(x_3) \vee \mu_h(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_h(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_h(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_h(x_3); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x) = & \mu_n(x_1) \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_6(x_3) \vee \mu_6(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_6(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_c(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_c(x_2) \wedge \mu_6(x_3) \vee \\ & \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_c(x_3); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu_6(x) = & \mu_6(x_1) \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_6(x_3) \vee \mu_6(x_1) \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_6(x_3) \vee \mu_6(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_6(x_3) \vee \mu_6(x_1) \wedge \mu_6(x_2) \wedge \mu_6(x_3). \end{aligned} \quad (7)$$

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних табл. 3 по відповідному терму:

$$\begin{aligned} \mu_n(x_1) = & \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \\ & \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \\ & \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_1) = & \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_e(x_{13}) \wedge \mu_e(x_{14}) \vee \mu_e(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_e(x_{14}) \vee \\ & \vee \mu_e(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_e(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_e(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_e(x_{14}) \vee \mu_e(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_e(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_e(x_{13}) \wedge \mu_e(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_e(x_{12}) \wedge \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \\ & \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_n(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_n(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_n(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \\ & \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu_6(x_1) = & \mu_c(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_c(x_{14}) \vee \\ & \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_c(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \mu_c(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}) \vee \mu_6(x_{11}) \wedge \\ & \wedge \mu_6(x_{12}) \wedge \mu_6(x_{13}) \wedge \mu_6(x_{14}). \end{aligned} \quad (10)$$

Дані експертної бази знань якісних термів для проєктних та монтажних параметрів представлено у табл. 4 і табл. 5. Ці таблиці містять детальну інформацію про терми, що використовуються для оцінки ключових параметрів, які впливають на надійність устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних виробів.

Таблиця 4
Експертна база знань якісних термів для проєктних параметрів (x_2)

Якщо			То
Вхідні змінні			Вихідна змінна
x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_2
1	2	3	4
В	В	В	В
В	С	В	
В	В	С	
В	В	В	
С	В	В	
С	В	С	С
С	С	В	
В	С	С	
С	С	С	
В	С	Н	
В	Н	С	
Н	С	В	
С	Н	В	
С	В	Н	
Н	В	С	
С	С	Н	Н
Н	С	С	
С	Н	С	
Н	Н	С	
С	Н	Н	
Н	С	Н	
Н	Н	Н	
В	Н	Н	
Н	В	Н	
Н	Н	В	

Таблиця 5
Експертна база знань якісних термів для монтажних параметрів (x_3)

Якщо			То
Вхідні змінні			Вихідна змінна
x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_3
1	2	3	4
В	В	В	В
В	С	В	
В	В	С	
В	В	В	
С	В	В	
С	В	С	С
С	С	В	
В	С	С	
С	С	С	
В	С	Н	
В	Н	С	
Н	С	В	
С	Н	В	
С	В	Н	
Н	В	С	
С	С	Н	Н
Н	С	С	
С	Н	С	
Н	Н	С	
С	Н	Н	
Н	С	Н	
Н	Н	Н	
В	Н	Н	
Н	В	Н	
Н	Н	В	

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності вихідних змінних табл. 4 по відповідному терму:

$$\begin{aligned} \mu_n(x_2) = & \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_6(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_6(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_6(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_2) = & \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_n(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_n(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_2) = & \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{23}) \vee \mu_c(x_{21}) \wedge \mu_c(x_{22}) \wedge \mu_c(x_{23}). \end{aligned} \quad (13)$$

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності вихідних змінних табл. 5 по відповідному терму:

$$\begin{aligned} \mu_n(x_3) = & \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_3) = & \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_n(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_n(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_n(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mu_c(x_3) = & \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \\ & \wedge \mu_c(x_{33}) \vee \mu_c(x_{31}) \wedge \mu_c(x_{32}) \wedge \mu_c(x_{33}). \end{aligned} \quad (16)$$

Отримані системи нечітких рівнянь (5)...(16) є основою для побудови поверхні належності, що використовуються у роботах (Rotshtein et al, 2020), (Djari, 2023), які будуть враховувати нечітке оцінювання впливу проєктних, монтажних та експлуатаційних факторів на надійність устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів спеціальними складами.

Висновки

На основі проведеного аналізу впливу факторів на надійність устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів встановлено ієрархічні зв'язки між факторами для оцінки надійності технічного стану і роботи устаткування на системному рівні з урахуванням кількісних та якісних ознак, що оцінюються лінгвістичними змінними. З метою моделювання оцінювання надійності устаткування сформовано експертні бази знань, які слугують основою для подальших досліджень і вдосконалення способів оцінювання надійності, зокрема методу, що використовує нечітку логіку. В результаті проведеного дослідження отримано нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних. Використання нечітких множин допомагає створити функції належності для кожного фактора, що враховують імовірність різних рівнів впливу на надійність, а також забезпечує більш точний аналіз у ситуаціях, де об'єктивні дані є обмеженими або розмитими.

Результати дослідження створюють підґрунтя для подальшого розвитку методів оцінки та підвищення надійності устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів. Встановлені залежності в подальшому дозволять побудувати функції належності. Побудова поверхні належності в аналізі з нечіткою логікою допоможе візуалізувати зміну результатів в залежності від впливу декількох факторів і дозволить чітко бачити залежності між вхідними лінгвістичними змінними та їхнім впливом на надійність устаткування.

REFERENCES

1. Abdelghafour, H., Abderrahim, Z., Rouabhi, R., & Ouagueni, F. (2024). New design of robust controller based on fuzzy 12 linguistic variables for wind power conversion system. *PRZEGLĄD elektrotechniczny*. 100. 89-92. doi: 10.15199/48.2024.10.16.
2. Djari, A. (2023). Influence of the membership functions number of fuzzy logic controller on the performances of dynamic systems, *Romanian Journal of Information Technology and Automatic Control*, 33(1), 93-106. doi: 10.33436/v33i1y202308.
3. Dui, H., Dong, X., & Tao, J. (2023). Reliability Evaluation and Prediction Method with Small Samples. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 8(4), 560-580. doi: 10.33889/IJMEMS.2023.8.4.032.
4. Fang, X., Wang, X., Feng, L., Zuo J., & Liu, S. (2024). Mission Reliability Modeling and Analysis Methods for Reconfigurable Ship Electronic Information Systems. *Applied Sciences*, 14(21), 9626. doi: 10.3390/app14219626.

5. Horiun, O. O. (2024). Hydrophobization of construction products using equipment for cyclic hydrothermal saturation. *Modern technologies, materials and structures in construction*, 36 (1), 58-63. doi: 10.31649/2311-1429-2024-1-58-63.
6. Jo, Seok-Un, Chae, Hak-Byeong, Park, Heejun, Jang, & Eunsuk. (2023). The Optimal Impregnation Amounts of Flame-Retardant for Korean Larch and Japanese Cedar Building Materials. *Wood Research*, (1), 179–186. doi: 10.20944/preprints202307.1787.v1.
7. Kots, I. V., & Horiun, O. O. (2020). Equipment for cyclic hydrothermal saturation of concrete and reinforced concrete products (Patent of Ukraine No. 140195). Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine.
8. Krasheninina, O., Yakovlev, S., & Golovko, Y. (2023). Evaluation of factors that ensure the reliability of the locomotive system. *Information and control systems in railway transport*, 28(2), 43-49. doi: 10.18664/ikszt.v28i2.283462.
9. Kristić M., & Žuškin S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849. doi: 10.3390/jmse12060849.
10. Mozafari, S. (2023). Probabilistic fatigue reliability assessment of the wind turbine's structural components. *DTU Wind and Energy Systems*, 152. <https://doi.org/10.11581/DTU.00000274>.
11. Povhan, I. F. (2020). Construction of logical trees of recognition based on the method of step-by-step selection of elementary signs. *Radio electronics, informatics, management*, 2, 95–105. doi: 10.15588/1607-3274-2020-2-10.
12. Qiyas, M., Abdullah, S., & Muneza (2021). A novel approach of linguistic intuitionistic cubic hesitant variables and their application in decision making. *Granul. Comput.* 6(1), 691–703. doi: 10.1007/s41066-020-00225-3.
13. Ratushnyak, G. S. & Pankevich, V. V. (2020). Hierarchical classification of influencing factors on increasing the energy efficiency of the thermal insulation envelope of buildings. *Modern technologies, materials and structures in construction*, 27(2), 204–209. doi: 10.31649/2311-1429-2019-2-204-209.
14. Ratushnyak, G. S., Lyaluk, O. G., & Horiun, O. Yu. (2022). Analysis of the influence of factors on the reliability of ensuring the energy efficiency of enclosing structures in connection nodes using linguistic variables. *Ventilation, lighting and heat and gas supply*, 40, 28–36. doi: 10.32347/2409-2606.2022.40.28-36.
15. Ratushnyak, H. S., & Pankevich, V.V. (2023). Identification of factors that determine the safety of windows under the action of a blast wave. *Modern technologies, materials and structures in construction*, 33(2), 42–48. doi: 10.31649/2311-1429-2023-2-42-48.
16. Rotshtein, A., Pustynnik, L., & Katielnikov, D. (2021). Fuzzy Cognitive Maps in Reliability Modeling. *Advancements in Fuzzy Reliability Theory. IGI Global*, 1-19. doi: 10.4018/978-1-7998-7564-2.ch001.
17. Sharma, A.K., Punj, P., Kumar, N., Das, A., & Kumar, A. (2024). Lifetime Prediction of a Hydraulic Pump Using ARIMA Model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(1), 1713–1725. doi: 10.1007/s13369-023-07976-6.
18. Shtovba, S. & Pankevich, O. (2011). Application of fuzzy models for the diagnosis of building structures. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4, 32-36.
19. Shved, A. V. (2024). Development of the methodology for assessment of membership function values on the basis of group expertise in the Fuzzy Decision Tree Method. *Radio electronics, informatics, management*, 2, 106. doi: 10.15588/1607-3274-2024-2-11.
20. Soe, H. M., & Htet, A. (2024). A Comprehensive Review of SCADA-Based Wind Turbine Performance and Reliability Modeling with Machine Learning Approaches. *Journal of Technology Innovations and Energy*, 3(3), 68–92. doi: 10.56556/jtie.v3i3.1028.
21. Subach, I., & Mykytiuk, A. (2023). The method of forming associative rules from the siem database - systems based on the theory of Fuzzy Sets and Linguistic Terms. *Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: education, science, technology"*, 3(19), 20–33. doi: 10.28925/2663-4023.2023.19.2033.
22. Trykoz, L., Zinchenko, O.S., Kalinin, O.A., & Nykytynskyi, A.V. (2024). Impact the treatment types of recycled concrete aggregates on concrete strength. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4(022), 126-133. doi:10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083.
23. Uryadnikova, I. (2024). Use of logical and graphic methods of risk analysis in water supply systems of thermal power plants. *Problems of water supply, drainage and hydraulics*, 47, 47–55. doi: 10.32347/2524-0021.2024.47.47-55.
24. Xu J., Yan Q., Pei Y., Liu Z., Cheng Q., Chu H., & Zhang T. (2024). A Statistical Evaluation Method Based on Fuzzy Failure Data for Multi-State Equipment Reliability. *Mathematics*, 12(9),1414. doi: 10.3390/math12091414.
25. Xuegang, L. (2015). A Reliability Prediction Method Based on Simulation Analysis. *Procedia Engineering*, 99, 219–223. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.529.
26. Zarzuela, R., Luna, A., Manuel, González Coneo, Jorge, Gemelli, Giada, Andreouli, Dia, Kaloidas, Vasilis, Mosquera, & María. (2023). Multifunctional silane-based superhydrophobic/impregnation treatments for concrete producing C-S-H gel: Validation on mockup specimens from European heritage structures. *Construction and Building Materials*, 367, 130258. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130258.
27. Zheng, M., & Yu, J. (2024). Reliability design involving optimization with multiple objectives by means of probabilistic multi-objective optimization. *J. Umm Al-Qura Univ. Eng.Archit.* doi: 10.1007/s43995-024-00082-0.

Коц Іван Васильович – к.т.н., професор кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: ivkots@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0870-6385.

Панкевич Ольга Дмитрівна – к.т.н., доцент кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0001-9391-3435.

Горюн Олег Олегович – доктор філософії, асистент кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0001-5678-835X.

Панкевич Володимир В'ячеславович – доктор філософії, асистент кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: pan@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-1929-8172.

O. Horiun
I. Kots
O. Pankevych
V. Pankevych

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE RELIABILITY OF EQUIPMENT FOR IMPULSE IMPREGNATION OF BUILDING MATERIALS

Vinnitsia National Technical University

The article presents the results of an analytical review of the reliability factors of modern equipment for hydroimpulse impregnation of building materials and products with special impregnation compounds. The object of research is equipment for processing building materials by impregnation. Such installations have found their use in the construction industry and allow to significantly improve the characteristics of building materials. Effective work, which involves ensuring the high-quality reproduction of all technological operations according to the specified parameters, requires the use of specific equipment, which during operation requires timely maintenance, regular repair work and other measures related to maintaining its normal functioning. Forecasting the reliability of the equipment for impulse impregnation of building materials is a necessary element of its design. The authors used fuzzy logic methods to build a model for assessing the reliability of the impregnator. Fine-tuning the model involves the use of genetic algorithms, which will provide a result depending on the sample. In the course of modeling, the authors set criteria that have a significant impact on the reliability and high-quality operation of the devices, namely: design, installation and operational factors that are characteristic of this equipment. In particular, the influence of design features, quality of installation, conditions of operation and maintenance on the duration of trouble-free operation of the equipment was investigated. The relevance of using the theory of fuzzy linguistic variables to assess the reliability of the equipment for the production of construction products is substantiated. As part of the study, a tree of logical conclusions of hierarchical relationships was built, which allows for a structured assessment of the interdependencies between various factors. Expert knowledge bases were formed and fuzzy logical equations were obtained, which characterize the surface of belonging of variables. The use of fuzzy logic methods makes it possible to monitor automatically and in real time, to determine and diagnose the causes of deviations in the actual characteristics during the operation of the equipment. This makes it possible to more accurately model and predict the reliability of the equipment in conditions of uncertainty, increasing the efficiency of its operation and maintenance, which creates the prerequisites for increasing the efficiency of the operation of the pulse impregnation equipment through more complete use of its resource.

Keywords: assessment of reliability; reliability factors and criteria; impregnation of capillary-porous bodies; mathematical modeling; building materials; equipment for manufacturing construction products; methods of fuzzy logic.

Kots Ivan – PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: ivkots@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0870-6385.

Pankevych Olha – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0001-9391-3435.

Horiun Oleh – Doctor of Philosophy (PhD), Assistant of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0001-5678-835X.

Pankevych Volodymyr – Doctor of Philosophy (PhD), Assistant of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: pan@vntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-1929-8172.