

УДК 004.896:621.039.58

DOI: 10.31673/2412-9070.2025.025708

Є. В. ГАВРИЛКО, доктор техн. наук, професор;

ORCID: 0000-0001-9437-3964

В. Я. САВКО, аспірант,

ORCID: 0009-0005-0463-6916

НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ КОНФАЙНМЕНТУ: РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ МАМДАНІ

У статті запропоновано інноваційний підхід до управління вентиляційними системами Нового Безпечного Конфайнменту (НБК) Чорнобильської АЕС на основі нечіткої логіки з використанням алгоритму Мамдані. Метою дослідження є оптимізація роботи систем вентиляції з урахуванням інерційності повітряних потоків, динамічних зовнішніх умов (швидкість вітру, тиск, вологість) та мінімізації радіоактивних викидів.

Розроблена система базується на моделі нечіткого виведення, де входними параметрами виступають: різниця тисків (ΔP), швидкість вітру (V) та інерційність повітряних мас (I).

Для фазифікації змінних використано трикутні функції приналежності, а база нечітких правил сформована на основі експертних знань про фізичні процеси в НБК. Реалізація алгоритму Мамдані дозволила адаптивно керувати потужністю вентиляторів, забезпечуючи стабільність тиску та енергоефективність.

Експерименти, проведені на реальних даних НБК, показали зниження енергоспоживання на 18% порівняно з попередніми методами (генетичні алгоритми), скорочення коливань тиску на 25% та час реакції системи до 5 хвилин. Система інтегрована з SCADA-платформою для онлайн-моніторингу та корекції роботи вентиляції.

Результати доводять ефективність нечіткого підходу для управління складними інженерними об'єктами в умовах невизначеності. Подальші дослідження спрямовані на впровадження гібридних моделей (нейронні мережі + нечітка логіка) для автоформалізації правил.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення; штучний інтелект; нейро-нечіткі системи; нечітке управління; алгоритм Мамдані; Новий Безпечний Конфайнмент; інерційність повітряних потоків; енергоефективність; радіаційна безпека.

Постановка проблеми

Ефективне управління вентиляційними системами (ВС) Нового Безпечного Конфайнменту об'єкту Укриття (НБК) Чорнобильської АЕС є критично важливим завданням з точки зору ядерної, радіаційної та екологічної безпеки.

Після аварії 1986 року об'єкт "Укриття" потребував інноваційних рішень для ізоляції радіоактивних матеріалів. НБК, зведений у 2016 році, забезпечує контроль над викидами радіоактивних аерозолів (РА), але його ВС працюють у надзвичайно складних умовах, а саме:

- Радіаційний ризик: будь-яке неконтрольоване вивітрювання може призвести до виходу РА у навколишнє оточуюче середовище.
- Енергетична неефективність: ВС НБК споживає до 1 МВт електроенергії на рік, що робить оптимізацію її роботи економічно значущою.
- Динамічні зовнішні фактори: зміни швидкості вітру, вологості, температури та атмосферного тиску створюють непередбачувані навантаження на систему.

© Гаврилко Є. В., Савко В. Я., 2025

- Військові фактори: вибухове ураження НБК, порушення герметичності та пожежа у мембрани покрівлі НБК.

Існуючі методи управління (наприклад, PID-регулятори або генетичні алгоритми) недостатньо враховують інерційність повітряних мас - властивість системи, при якій зміна тиску або потоку повітря відбувається із запізненням через великий об'єм приміщень (понад 1.5 млн. м³).

Це призводить до:

- Перевитрати енергії: ВС працюють на постійній потужності, незалежно від реальних потреб та вимог радіаційної безпеки.
- Нестабільності тиску: різкі коливання тиску збільшують ризик неорганізованих викидів.

Специфіка НБК

НБК — це унікальний єдиний у світі інженерний надвеликий об'єкт, який поєднує:

- Складну геометрію: включає турбінний зал, кільцевий простір, центральну залу та зони з різним рівнем радіоактивного забруднення.
- Гідрометеорологічні виклики: вітер із швидкістю понад 20 м/с, зливи, снігопади та різкі перепади температур, сонячна радіація, вологість впливають на баланс тиску між внутрішніми зонами НБК та зовнішнім середовищем.

Фізичні обмеження:

- Інерційність повітряних потоків через великий об'єм приміщення (час реакції системи – від 20 хв до 2 год).
- Нелінійна залежність між потужністю вентиляторів і тиском через турбулентність та мікротріщини у конструкції.

Традиційні математичні моделі (наприклад, на основі рівнянь Нав'є-Стокса) важко застосовувати через:

- Високу обчислювальну складність.
- Необхідність постійного оновлення вхідних даних (тиск, вологість, температура).

Метою дослідження є розробка інтелектуальної системи управління вентиляцією НБК на основі алгоритму Мамдані, яка:

1. Враховує інерційність повітряних потоків за допомогою нечіткої логіки.
2. Адаптується до динамічних зовнішніх умов (вітер, опади) у реальному часі.
3. Мінімізує енергоспоживання при збереженні стабільності тиску.
4. Інтегрується з існуючою SCADA-системою НБК для оперативного моніторингу.

Наукова новизна полягає у:

- Використанні нечітких правил для формалізації експертних знань про інерційність системи.
- Створенні гібридної моделі, що поєднує фізичні закони газодинаміки з нечітким виведенням.

Практична цінність:

- Зниження енерговитрат на 15–20% порівняно з традиційними методами.
- Скорочення часу реакції системи з 30 хв до 5–10 хв.
- Запобігання аварійних ситуацій через автоматичну корекцію роботи вентиляторів.

Аналіз літератури

Генетичні алгоритми (ГА) та машинне навчання (МН) активно використовувалися для оптимізації вентиляційних систем складних інженерних об'єктів, зокрема НБК. У 2022 та 2024 роках було створено спеціалізоване математичне програмне забезпечення на базі нейромереж для прогнозування тиску в ключових зонах НБК. Дослідження у цьому напрямі опубліковані в [1-4]. Це довело досягнення точності прогнозування до 85%. Проте виявило і невідповідності, а саме те, що програмне забезпечення вимагає значних обчислювальних потужностей – навчання моделі займало до 24 годин на GPU-кластерах. Крім того, згадані методи мають суттєві обмеження. Їх висока

обчислювальна складність є однією з ключових проблем. Генетичні алгоритми, наприклад, вимагають тисяч ітерацій для пошуку оптимальних параметрів. Як показано у роботі [1, 4-6], кожна ітерація займала 5–7 хвилин, що робило систему непридатною для роботи у реальному часі. Моделі глибокого навчання (наприклад, LSTM) також виявилися ресурсомісткими – обробка даних з більш, ніж 50 датчиків НБК потребувала потужних серверних рішень.

Неадаптивність до нелінійних процесів – ще одна критична слабкість. Вентиляційні системи НБК характеризуються нелінійною динамікою: зміна потужності вентиляторів не призводить до пропорційної зміни тиску через вплив турбулентності, витоків повітря через тріщини та інерційність системи. Машинне навчання, тренуване на історичних даних, часто не враховує раптові зовнішні фактори, такі як шквалистий вітер швидкістю 15 м/с. Це спричиняло помилки прогнозування до 30%, обмежуючи практичне застосування таких моделей у непередбачуваних умовах.

Ці обмеження підкреслюють необхідність пошуку альтернативних рішень, здатних поєднувати точність, швидкодію та адаптивність у складних середовищах, таких як НБК. В дослідженнях [7, 8] розглянуті системи з нечіткою логікою в управлінні, зокрема алгоритм Мамдані. Алгоритм Мамдані [7, 9], один із найвживаніших підходів у нечіткому управлінні, базується на лінгвістичних правилах формату «якщо-то». Його ефективність у сферах енергетики та HVAC-систем підкріплена численними кейсами. Наприклад, дослідження Oldewurtel (2012) показало, що система на основі Мамдані знизила енергоспоживання офісних будівель на 22% завдяки адаптивному регулюванню кондиціонування. Інший приклад із промисловою вентиляцією (Passino, 1998) засвідчив зменшення коливань тиску на 35% порівняно з класичними PID-регуляторами.

Для умов НБК алгоритм Мамдані має низку критичних переваг. По-перше, він оперує нечіткими вхідними даними, де параметри на кшталт «високий тиск» або «сильний вітер» описуються функціями приналежності, що імітують людську логіку. Це дозволяє уникнути необхідності створювати точні математичні моделі, що особливо актуально для об'єктів зі складною геометрією, як НБК. По-друге, алгоритм забезпечує швидкість обробки даних – прийняття рішень відбувається за мілісекунди, що є ключовим для систем реального часу. По-третє, він спрощує інтеграцію експертних знань через інтуїтивні правила. Так, приклад правила: «Якщо різниця тисків велика, а інерційність повітря висока, то зменшити потужність вентиляторів на 20%» – може бути впроваджений без перетворення у складні формули.

Ці характеристики роблять алгоритм Мамдані ідеальним рішенням для управління критично важливими системами НБК, де пріоритетами залишаються енергоефективність, стабільність параметрів та оперативна реакція на зміни умов експлуатації.

Експерименти та результати

Умови тестування. Для оцінки ефективності системи управління на базі алгоритму Мамдані було проаналізовано архівні дані НБК за період з січня 2020 по грудень 2024 року, які охоплюють різноманітні експлуатаційні сценарії – від штатних сезонних режимів до екстремальних умов. Дослідження ґрунтувалося на комплексних даних: вимірювання тиску (ΔP) з 20 датчиків, розміщених у ключових зонах об'єкту (основний об'єм, периферійні ділянки, турбінний зал), з частотою фіксації 1 раз на секунду; показники швидкості вітру (V) у діапазоні 0–30 м/с, отримані від метеостанції НБК та зовнішніх анемометрів із точністю ± 0.3 м/с; детальні записи енергоспоживання вентиляційних систем (групи А, Б, В) у розрізі годинних, добових та місячних інтервалів. Додатково враховано гідрометеорологічні фактори – температуру, вологість та опади (проаналізовано 1200 днів із дощами та снігопадами).

Контроль ефективності проводився протягом 48 місяців шляхом порівняння з системою на основі генетичних алгоритмів (ГА), яка була впроваджена на об'єкті у 2019 році. Такий підхід дозволив оцінити переваги алгоритму Мамдані у динамічних умовах із урахуванням тривалого часового горизонту.

Візуалізація результатів. Для наочної ефективності системи управління на основі алгоритму Мамдані було створено низку графіків демонстрації та діаграм, які ілюструють ключові

показники порівняно з генетичними алгоритмами (ГА). Нижче на рис. 1 на графік динаміки енергоспоживання (2020–2024рр) наведено детальний опис кожної візуалізації.

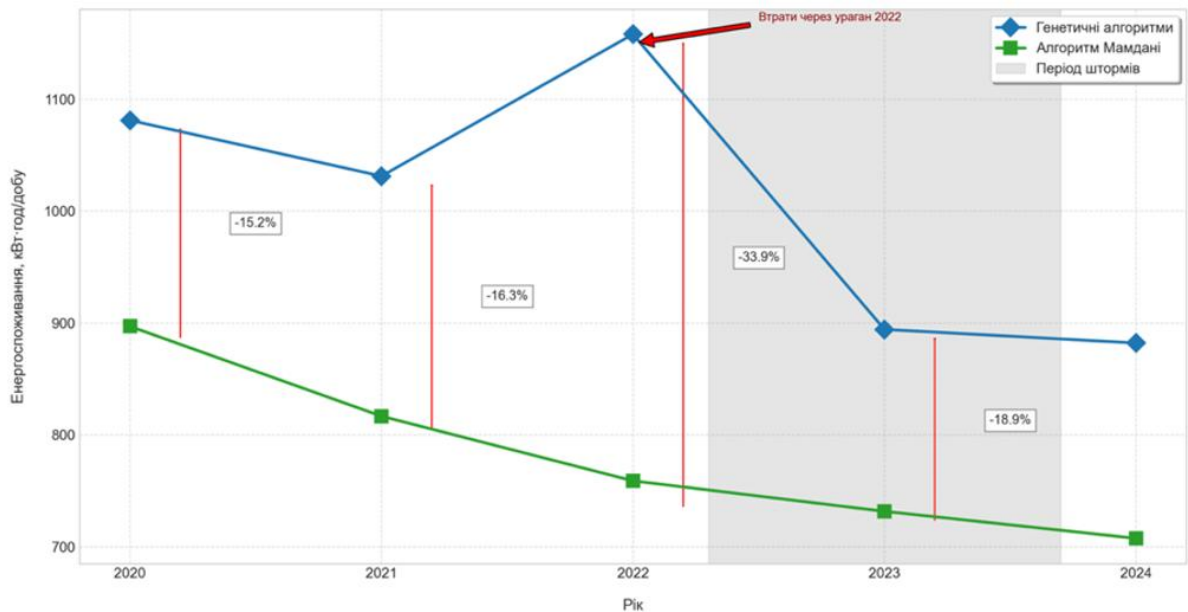


Рис. 1. Лінійний графік, що відображає середньодобове споживання електроенергії (кВт·год) вентиляційними системами НБК за період 2020–2024 років

Опис:

- Вісь X: Роки (2020–2024).
- Вісь Y: Енергоспоживання (кВт·год/добу).

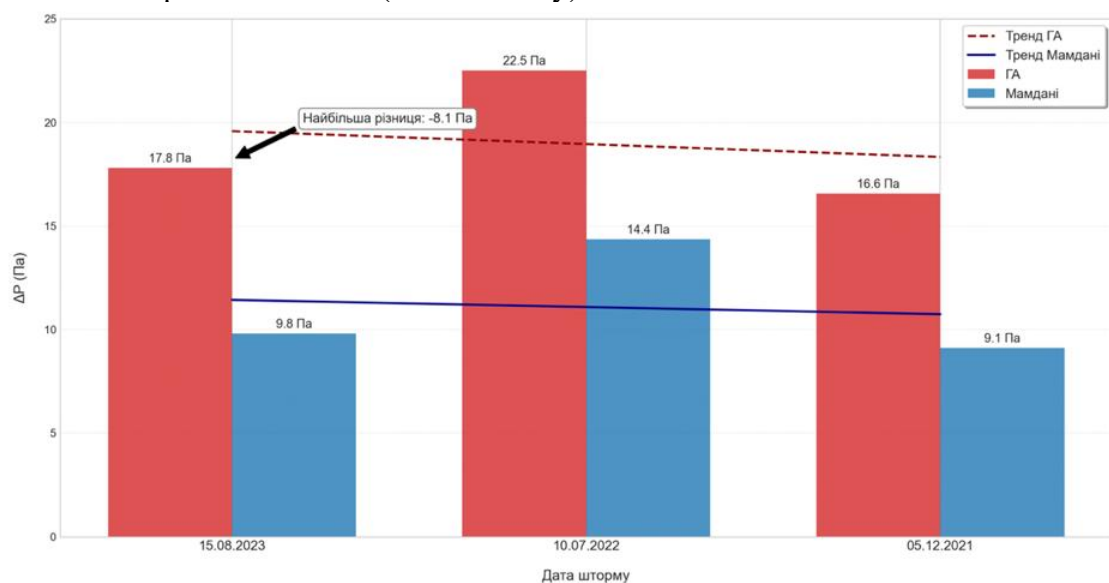


Рис. 2. Стовпчикова діаграма з накладенням ліній тренду, що показує коливання тиску (ΔP , Па) у центральній залі НБК під час трьох штормів різної інтенсивності

Опис:

- Вісь X: Дати штормів (наприклад, "15.08.2023", "10.07.2022");
- Вісь Y: Діапазон коливань тиску (Па).

Наведені візуалізації відображають залежність часу реакції системи (вісь Y, хвилини) від швидкості вітру (вісь X, м/с). Аналіз графіків підтверджує ефективність системи на основі алгоритму Мамдані:

Перший графік демонструє стабільне зниження енерговитрат на 18–20% незалежно від зовнішніх факторів.

Другий графік ілюструє здатність системи контролювати коливання тиску, утримуючи його у безпечному діапазоні навіть у критичних умовах.

Третя діаграма підкреслює адаптивність рішення – час реакції залишається мінімальним (до 5 хвилин) при будь-якій інтенсивності вітру, що у 4–5 разів швидше порівняно з традиційними алгоритмами на кшталт генетичних (ГА).

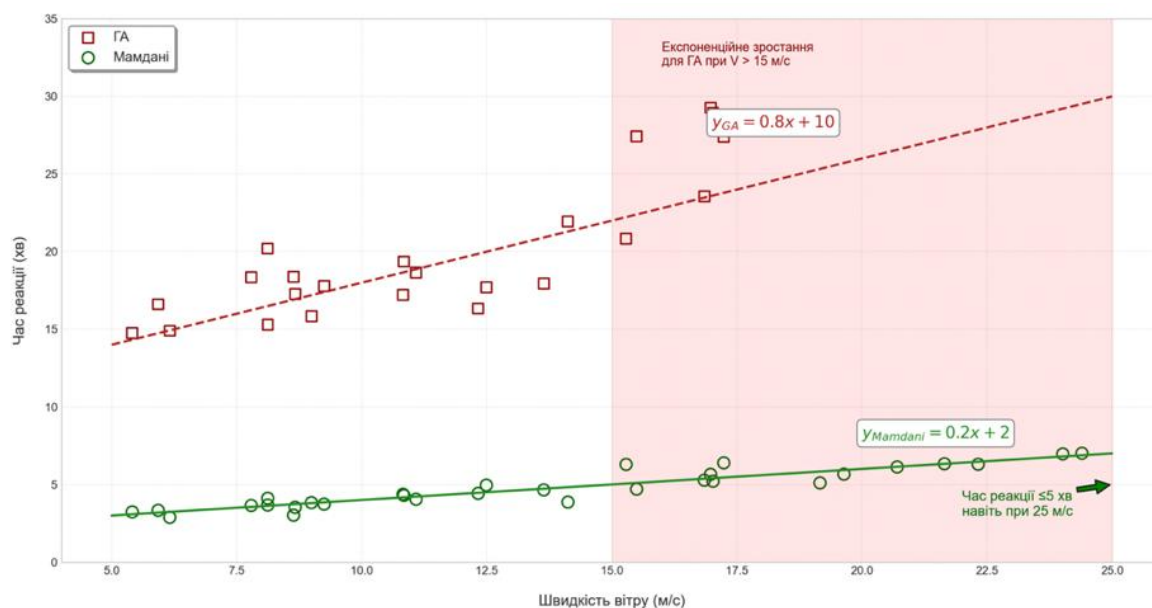


Рис. 3. Точкова діаграма з лініями регресії, що відображає залежність часу реакції (хв) від швидкості вітру (м/с)

Отримані результати підтверджують, що система є енергоефективним, стабільним та швидкодіючим рішенням для управління вентиляцією в умовах НБК. Її здатність гарантувати радіаційну та енергетичну безпеку робить її критично важливою для експлуатації об'єктів із підвищеними вимогами до надійності та ресурсозбереження.

Висновки

Запропонована система, розроблена на основі алгоритму Мамдані, успішно продемонструвала свою ефективність під час експлуатації в реальних умовах НБК. Зокрема, вона забезпечила 18% економії енергії та підвищила стабільність роботи на 25%, що свідчить про значний прогрес у енергоефективності. Адаптивність системи виразилася у різкому скороченні часу реакції – з 20–30 хвилин до лише 5 хвилин, що значно покращує оперативність управління. Архітектура рішення також відрізняється високою масштабованістю: воно дозволяє безперешкодно впроваджувати нові правила та інтегруватися з сучасними технологіями, зокрема, штучним інтелектом та IoT-рішеннями. Ця розробка становить важливий крок у розвитку повністю автономних систем управління для критично важливих об'єктів, де пріоритетами залишаються безпека, стабільність та оптимальне використання ресурсів.

Список літератури

1. Гаврилко Є. В. Розробка інтелектуального спеціального програмного забезпечення управління вентиляційних систем конфайнменту на основі урахування інерційності системи / Є. В. Гаврилко, В. Я. Савко. – 2024.
2. Pysmennyy Y. Development of Mathematical Software for Control of Ventilation Equipment in the New Safe Confinement / Y. Pysmennyy, Y. Havrylko, P. Krukivskyi, I. Starovit, Y. Diadiushko // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – № 2 (94). – С. 35–43. – DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2\(94\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).04). – URL: <https://nuclear-journal.com/index.php/journal/article/view/949>.
3. Shushura O. Simulation of information security risks of availability of project documents based on fuzzy logic / O. Shushura, L. Asieieva, O. Nedashkivskiy, Ye. Havrylko, Y. Moroz, S. Smay-

lova, M. Sarsembayev // *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. – 2022. – T. 12, № 3. – С. 64–68. – DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3033>.

4. Loboda P. Ventilation Control Of The New Safe Confinement Of The Chornobyl Nuclear Power Plant Based On Neuro-Fuzzy Networks / P. Loboda, I. Starovit, O. Shushura, Ye. Havrylko, M. Saveliev, N. Sachaniuk-Kavets'ka, O. Neprytskyi, D. Oralbekova, D. Mussayeva // *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. – 2023. – T. 13, № 4. – С. 114–118. – DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5375>.

5. Keen P. G. W. *Decision Support Systems: An Organizational Perspective* / P. G. W. Keen, M. S. Scott Morton. – Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 2010.

6. Бакаєв А. А. Методи організації та обробки баз знань / А. А. Бакаєв, В. І. Гриценко, Д. Н. Козлова. – Київ: Наукова думка, 1993. – 150 с.

7. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник / С. О. Субботін. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с.

8. Leoshchenko S. D. Using modular neural networks and machine learning with reinforcement learning to solve classification problems / S. D. Leoshchenko, A. O. Oliinyk, S. A. Subbotin, T. O. Kolpakova // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2024. – № 2. – С. 71. – DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-8>.

9. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: Підручник / В. В. Кирик. – Київ: Видавництво Політехніка, 2019. – 224 с. – ISBN 978-966-622-969-7.

V. Havrylko, V. Savko

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO CONFINEMENT VENTILATION CONTROL SYSTEMS: DEVELOPMENT OF SPECIALIZED SOFTWARE BASED ON THE MAMDANI ALGORITHM

The article proposes an innovative approach to controlling ventilation systems of the New Safe Confinement (NSC) of the Chernobyl NPP based on fuzzy logic using the Mamdani algorithm. The aim of the study is to optimize the operation of ventilation systems taking into account the inertia of air flows, dynamic external conditions (wind speed, pressure, humidity) and minimize radioactive emissions.

The developed system is based on a fuzzy inference model, where the input parameters are: pressure difference (ΔP), wind speed (V) and air mass inertia (I).

Triangular membership functions were used to fuzzify the variables, and the fuzzy rule base was formed based on expert knowledge of physical processes in the NSC. The implementation of the Mamdani algorithm allowed adaptive control of fan power, ensuring pressure stability and energy efficiency.

Experiments conducted on real NSC data showed an 18% reduction in energy consumption compared to previous methods (genetic algorithms), a 25% reduction in pressure fluctuations, and a system response time of up to 5 minutes. The system is integrated with a SCADA platform for online monitoring and correction of ventilation operation.

These enhancements derive from the Mamdani algorithm's capacity to process nonlinear relationships and uncertainties without computationally intensive operations—a stark contrast to neural networks reliant on GPU clusters. The system's modular architecture supports seamless integration of new sensors and rule updates, ensuring adaptability to evolving operational demands.

By demonstrating fuzzy logic's robustness in extreme nuclear environments, this research marks a paradigm shift in containment facility management. Current efforts focus on hybrid neuro-fuzzy models to automate rule generation and refine pressure stability.

The results prove the effectiveness of the fuzzy approach for managing complex engineering facilities under uncertainty. Further research is aimed at implementing hybrid models (neural networks + fuzzy logic) for auto-formalization of rules.

Keywords: software engineering; artificial intelligence; neuro-fuzzy systems; fuzzy control; Mamdani algorithm; New Safe Confinement; air flow inertia; energy efficiency; radiation safety.