

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 004.853; 504.064

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.1>**Є. В. ГАВРИЛКО**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0001-9437-3964

**В. Я. САВКО**

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0009-0005-0463-6916

## РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ КОНФАЙНМЕНТУ НА ОСНОВІ УРАХУВАННЯ ІНЕРЦІЙНОСТІ СИСТЕМИ

*В статті викладені подальші дослідження процесів переміщення повітряних мас забруднених радіоактивними аерозолями всередині та навколо Нового Безпечного Конфайнменту (НБК) над об'єктом «Укриття» Чорнобильській атомній електростанції з урахуванням інерційності поведінки повітряних мас та на їх основі розробці інтелектуального спеціального математичного програмного забезпечення роботи вентиляційних систем на основі машинного навчання з підкріпленням на основі генетичних алгоритмів.*

*Стаття є продовженням досліджень з розроблення на нових наукових засадах діювого програмного забезпечення управління вентиляцією конфайнменту. Попередні дослідження були опубліковані в [5] цього наукового видання і знайшли широкий відклик інтернаціональної наукової спільноти.*

*Розроблений і реалізований генеративний алгоритм інтелектуального спеціального програмного математичного забезпечення буде навчений на пошуку функцій шляхом аналізу великих обсягів даних.*

*Даним, що були застосовані в ході розробки програмного забезпечення стали історичні данні гідродинамічного стану забрудненого радіоактивними аерозолями повітря під НБК і гідрометеорологічні данні, що відповідають часовим показникам того періоду часу.*

*Розроблене програмне забезпечення дозволить під час експлуатації вентиляційних систем НБК врахувати інерційність повітряних мас під НБК та оптимізувати по критерію мінімізації витрати електроенергії та викиди РА.*

*Розробка і впровадження інтелектуального програмного забезпечення для управління вентиляційними системами відкриває можливості для подальшого розвитку в цій галузі. Можливе використання аналізу даних для постійного вдосконалення алгоритмів управління, а також інтеграція з системами штучного інтелекту для автоматичного реагування на зміни у середовищі. Це сприятиме підвищенню ефективності та безпеки експлуатації не лише об'єктів Чорнобильської зони, а й інших промислових та екологічно чутливих об'єктів.*

**Ключові слова:** інженерія програмного забезпечення, архітектура програмного забезпечення, спеціальне математичне програмне забезпечення, бази даних, нейромережі, генеративні алгоритми, радіоактивні аерозолі, Новий безпечний конфайнмент, атомна електростанція, вентиляційна система.

E. V. GAVRILKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Software Security Engineering in Energy  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0001-9437-3964

V. Y. SAVKO

Postgraduate Student at the Department of Software Security Engineering in Energy  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0009-0005-0463-6916

## DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL SPECIAL SOFTWARE FOR SECURE CONTROL OF VENTILATION SYSTEMS FOR CONFINEMENT BASED ON THE SECURE INERTITION OF THE SYSTEM

*The article presents further studies of the processes of movement of air masses contaminated with radioactive aerosols inside and around the New Safe Confinement (NSC) over the «Shelter» facility of the Chernobyl nuclear power plant, taking into account the inertia of the behavior of air masses and, on their basis, the development of intelligent special mathematical software for the operation of ventilation systems based on machine learning with reinforcement based on genetic algorithms.*

*The article is a continuation of research on the development of effective software for controlling confinement ventilation on new scientific bases. Previous studies were published in [5] of this scientific publication and found a wide response from the international scientific community.*

*The developed and implemented generative algorithm of intelligent special mathematical software will be trained on finding functions by analyzing large volumes of data.*

*The historical data of the hydrodynamic state of air contaminated with radioactive aerosols under the NBK and hydrometeorological data corresponding to the time indicators of that time period were the data used during the development of the software.*

*The developed software will make it possible to take into account the inertia of the air masses under the NSC during the operation of the NSC ventilation systems and optimize according to the criterion of minimizing electricity consumption and RA emissions.*

*Development and implementation of intelligent software for controlling ventilation of sequential power take-off for additional development in this area. You can perform data analysis to search for control algorithms at a point, as well as integration with sequential intelligence to automatically respond to changes in the middle. This pleasantly increases the efficiency and unemployment of the operation of not only the Chernobyl zone facilities, but also other industrial and environmentally friendly facilities.*

**Key words:** *software engineering, software architecture, special mathematical software, databases, neural networks, generative algorithms, radioactive aerosols, New safe confinement, nuclear power plant, ventilation system.*

### Постановка проблеми

Забезпечення ядерної, радіаційної та, комплексно, екологічно безпечної експлуатації НБК над Об'єктом «Укриття» (ОУ) на Чорнобильській АЕС є складною і багатофакторною задачею. На рис. 1 наведений вигляд НБК. НБК – надвелика спеціалізована споруда з великою кількістю спеціалізованого обладнання та потужного устаткування. Крім всього ключовою функцією НБК ОУ є забезпечення задачі ЯБ та РБ.

Споруда спроможна забезпечити поводження, обіг, очистку 1 500 000 м<sup>3</sup> забрудненого повітря. Це забезпечується використанням вентиляційних систем та осушувачів (ВОС) НБК (рис. 1).

Ці ВС поділяються на три основні категорії, а саме системи: що подають повітря ззовні до ОО (ВС типу А); подають повітря до периферійного простору конструкції (тип Б); виводять повітря з НБК назовні, проходячи через спеціалізовані фільтрувально-поглинаючі системи для контролю радіоактивних викидів (тип В).

Одна з важливих задач цих систем – запобігання виходу повітря за межі конструкції без належної фільтрації, особливо при неконтрольованому проникненні зовнішнього повітря, спричиненому вітровими навантаженнями.

Керування гідродинамічних процесів в НБК складний процес, що забезпечується маніпуляцією тисками в ОО та КП шляхом використання потужності ВС.

НБК включає турбінний зал, пошкоджений реактор, центральну залу, основний об'єм, круговий простір та периферійний простір.

Керуючий персонал користується Технологічним регламентом, який визначає режими роботи ВС лише на визначених розробником потужностях, що за проведеними розрахунками здатні забезпечити мінімізацію викидів РА. Річна витрата енергії на забезпечення експлуатації НБК складає 1 МВт. Найбільші витрати припадають на ВС.



**Рис. 1. Новий Безпечний Конфайнмент об'єкту «Укриття» Чорнобильської атомної електростанції. Вигляд з середини**

Управління цими повітряними потоками залежить від багатьох факторів, які доцільно обробляти з застосуванням сучасних програмних засобів, штучний інтелект яких, за певних обставин і навченості спроможне побудувати залежності і функції, що будуть спроможні забезпечити планування зменшення чи збільшення потужності ВС за 0,2–0,5 години для прийняття оптимальних рішень з урахуванням інерційності об'єму зараженого повітря в НБК.

Відсутність урахування інерційності може призвести до недостатньо ефективного контролю викидів РА, особливо в умовах, що швидко змінюються.

Саме тому існує нагальна потреба в розробці більш досконалих методів керування, які б враховували інерційні властивості НБК та забезпечували б більш точне та ефективне регулювання вентиляційних процесів у відповідь на змінні умови навколишнього середовища.

Розробка таких методів дозволить не тільки покращити контроль над потенційними викидами РА, але й сприятиме забезпеченню вищого рівня радіаційної та екологічної безпеки за умови також і зменшення витрати енергії, що є актуальним завданням інженерії програмного забезпечення.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У статті [1] описано використання інтелектуального аналізу даних для ідентифікації ненормального споживання енергії в будівлях. Автор розробив методику, що дозволяє виявляти неефективну роботу систем HVAC, спираючись на детальний аналіз споживаних енергетичних даних. Ця робота вносить вклад у розвиток методів діагностики систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, підкреслюючи важливість даних для ефективного управління енергоспоживанням.

В дослідженні [2] розглянуто застосування модельно-прогнозуючого управління (MPC) та прогнозів погоди для зниження енергоспоживання в будівлях. Результати вказують на значне покращення енергоефективності кліматичного контролю, демонструючи потенціал MPC в управлінні будівельними системами з урахуванням мінливих погодних умов.

Автори [3] концентрують увагу на використанні MPC для оптимізації роботи систем охолодження в будівлях. Їх підхід дозволяє знизити енергоспоживання та покращити умови комфорту за рахунок ефективного регулювання параметрів роботи систем охолодження, враховуючи змінні умови експлуатації.

В [4] пропонують використання навчання з підкріпленням для модельно-прогнозуючого управління в системах HVAC з метою зниження як миттєвого, так і довгострокового споживання електроенергії. Демонструється, як історичні дані можуть бути використані для підвищення ефективності управління енергоспоживанням, підкреслюючи важливість адаптивних методів в енергетичному менеджменті.

Дослідження показали, що користування такими підходами, що застосовуються до менших приміщень, і які можуть, за певних умов і підходів, масштабуватися і застосуватися до НБК ОК ЧАЕС.

У науковій літературі описані численні «network» моделі, що дозволяють моделювати витрати вентиляційних систем з урахуванням різних зовнішніх та внутрішніх чинників, зокрема швидкості вітру.

Ці моделі забезпечують засоби для оптимізації роботи вентиляційних установок, але часто не враховують інерційні характеристики великих об'ємів, як-от об'єм НБК.

Досвід проектування та експлуатації чистих кімнат може надати цінні знання для вирішення проблеми контролю над викидами в НБК, оскільки обидва типи об'єктів вимагають ретельного управління повітряними потоками та мінімізації забруднення.

В роботі [5] детально обґрунтовано, розроблено та верифіковано СПМЗ, що стало першим програмним продуктом, що реалізує нейромережу у машинному навчанні нейронної мережі для оптимізації роботи управління

вентиляційними установками Нового безпечного конфайнменту та запропоновано СПМЗ, яке спроможне врахувати багатofакторні показники обігу повітря в та поза НБК.

В [6] проведено аналіз неорганізованих протічок шляхом застосування нейрон-нечіткого моделювання. Розроблено відповідне програмне забезпечення і його роботу моделювання в середовище MathcadPrime.

**Формулювання мети та завдання дослідження**

Завданням, що ставиться в цій публікації є розробка інтелектуального СПМЗ на основі машинного навчання з підкріпленням на основі генетичних алгоритмів, що дозволить під час експлуатації ВС НБК врахувати інерційність повітряних мас під НБК та оптимізувати по критерію мінімізації витрати електроенергії та викиди РА.

**Метою роботи** є забезпечення оптимізації витрати електроенергії ВС при мінімумі неконтрольованих викидів РА за межі НБК.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Враховуючи складність управління ВС на базі контролю необхідного балансу тиску і з метою оптимізації їх роботи з урахуванням інерційності управління, розроблена архітектура СПМЗ.

На рисунку 2 представлено діаграму варіантів використання (UML use case diagram), яка демонструє взаємодію між основними акторами системи: інженером з вентиляції, системним адміністратором та моделлю штучного інтелекту. Ця діаграма виразно показує, як користувачі можуть взаємодіяти з системою для досягнення оптимальної ефективності вентиляційних установок.

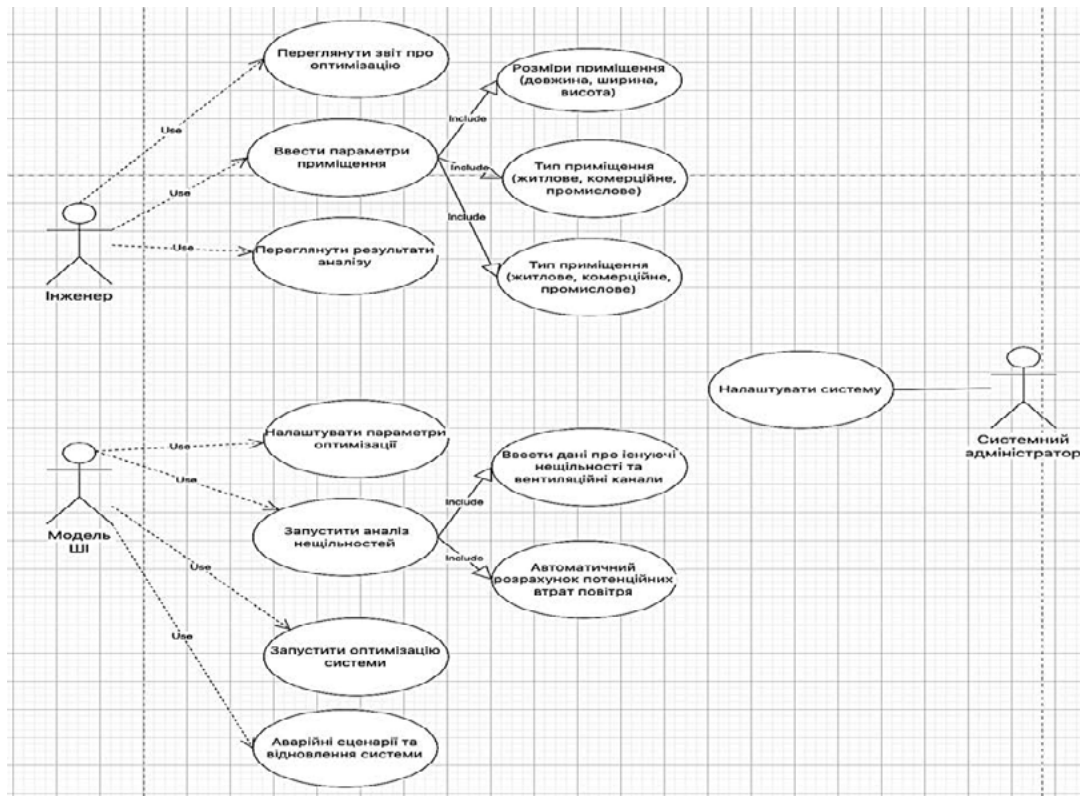


Рис. 2. UMLusecase діаграма взаємодії користувачів з системою

Діаграма ілюструє ключові функціональні можливості, які програма надає користувачам, включаючи введення параметрів приміщення для точного моделювання умов роботи ВС, запуск алгоритмів аналізу поточних нещільностей і можливих втрат повітря, перегляд і аналіз результатів для визначення потреби у корекції налаштувань.

На рисунку 3 зображена архітектуру системи, представлену у формі діаграми класів. Тут детально відображено, як складові системи спілкуються між собою, які дані обробляють та які методи використовують для досягнення цілей оптимізації.

Інтелектуальне СПМЗ для управління ВУ НБК включає кілька ключових етапів:

**1. Обрання алгоритмів.**

Для інтелектуального СПМЗ обрано Генетичний алгоритм (ГАл). В нашому випадку ГАл є більш відповідним задачі еволюційним алгоритмом пошуку, що нами використовується для вирішення задач моделювання за для пошуку комбінацій й варіантів потужності ВС, послідовного підбору з комбінування варіації показників, що будуть нами відібрані в тому числі і за допомогою експертів.

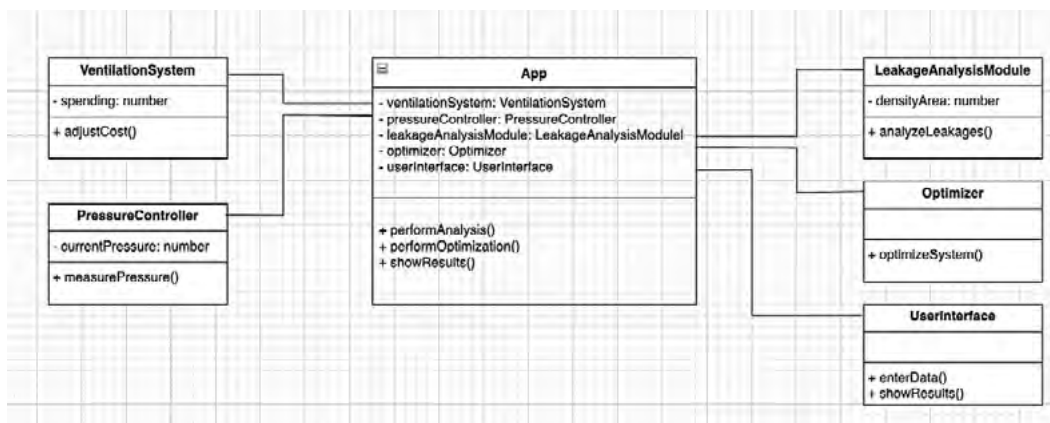


Рис. 3. Архітектура системи

**2. Збір і нормалізація даних.**

Данні з зовнішніх та внутрішніх датчиків, збираються в базу даних НБК. Ці дані, отримані з широкого спектру зовнішніх та внутрішніх датчиків, є фундаментом для всіх наступних етапів аналізу та управління. Зібрані в базу даних НБК, вони проходять через процес обробки з використанням програмних засобів, що дозволяє точно визначити параметри роботи ВС.

Основні зібрані гідрометеорологічні показники включають:

$$M_i = F \langle M_1; M_2; M_3; M_4; M_5 \dots \rangle, \tag{1}$$

$M_1$  – швидкість вітру – визначає інтенсивність та потенційний вплив вітру на НБК, впливаючи на розрахунки тиску та вентиляційні потреби.

$M_2$  – вологість повітря – зовнішня та внутрішня вологість визначають умови працездатності ВС, а також впливають на рівні конденсації та загальний комфорт у НБК.

$M_3$  – опади (дощ/сніг) – наявність та тип опадів впливають на робочі параметри НБК, зокрема на управління зовнішніми впливами та забезпечення стабільності систем.

$M_4$  – напрям вітру – важливий для аналізу впливу вітрового навантаження на конструкції НБК та для оптимізації розміщення вентиляційних виходів.

Особливу увагу приділяється моделюванню вітрового навантаження, оскільки це дозволяє точно прогнозувати зміни тиску у критичних зонах моніторингу НБК.

Це сприяє підвищенню ефективності управління ВС НБК ОУ ЧАЕС, дозволяючи своєчасно реагувати на будь-які зміни у робочому середовищі.

**3. Тренування генеративного алгоритму (ГАл).**

Тренування ГАл для прогнозування параметрів тиску в ОО та КП є ключовим елементом в управлінні ВС НБК. Використання даних, що містять  $n$  вимірів за часом і  $k$  параметрів експлуатаційних даних на кожен момент часу, дозволяє створити високодеталізовану картину робочих процесів.

На рисунку 4 представлена структура моделі НМ, яка є прикладом використання функції активації ReLU (Rectified Linear Unit) та адаптивного методу оптимізації Adam. Ці технології вибрані завдяки їхній ефективності

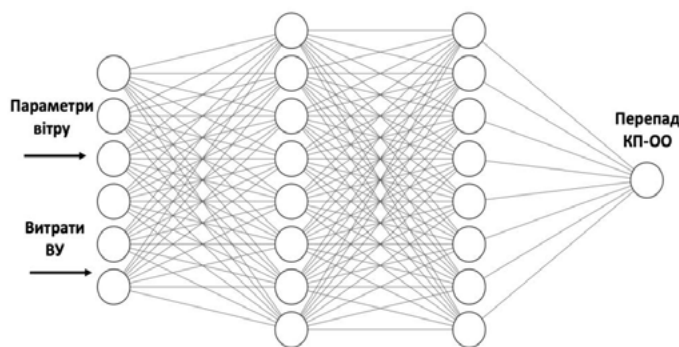


Рис. 4. Модель ГАл для аналізу показників та пошуку функції управління ВС

у мінімізації середньоквадратичної помилки, що приблизно на 10–30% підвищує точність прогнозування порівняно з іншими моделями.

Особливістю цього підходу є застосування двох окремих НМ для аналізу та прогнозування параметрів тиску у двох різних зонах НБК. Таке розділення дозволяє забезпечити високу спеціалізацію мереж і оптимізувати їхню роботу з конкретними даними. Кожна мережа тренується на половині доступних даних і перевіряється на іншій половині, що дозволяє забезпечити високу надійність та точність прогнозів.

Тренування НМ забезпечує можливість «прогнозування» тиску в НБК з урахуванням мінливих зовнішніх умов, таких як характеристики вітру, та змін у роботі ВС.

#### 4. Забезпечення інерційності ВС.

Забезпечення інерційності ВС є критично важливим аспектом управління середовищем в НБК на ВУ ЧАЕС. Це дозволяє ефективно контролювати обсяги повітряного потоку, що переміщується між внутрішнім простором НБК і зовнішнім середовищем, з метою мінімізації витоків та оптимізації енергоспоживання. Систематичний підхід до налаштувань агрегатів забезпечує високу адаптивність системи до зовнішніх змін та експлуатаційних потреб.

У кожен конкретний часовий інтервал і, враховуючи задані зовнішні умови тиску, виконується оптимізація роботи вентиляційних агрегатів. Вентиляційні агрегати типу В налаштовуються відповідно до потреб, тоді як агрегати типу А та Б зазвичай працюють на стандартних або мінімальних рівнях потужності. Такий підхід дозволяє забезпечити необхідний контроль за обсягами повітря, що переміщується, при цьому зберігаючи енергетичну ефективність системи.

Перший крок у цьому процесі полягає у використанні моделей НМ для обчислення тисків у основному об'ємі та кільцевому просторі. Потім, на основі отриманих даних про тиск, виконуються розрахунки об'ємних потоків повітря з основного об'єму за принципами рівняння Бернуллі, враховуючи також площі витоків та гідравлічний опір системи.

Об'ємний потік  $G$ , що вимірюється в кубічних метрах на секунду, визначається як добуток коефіцієнта витoku, ефективної площі витoku, різниці статичних тисків, та оберненого значення гідравлічного опору. Завдяки точним обчисленням можливо знайти оптимальні налаштування для вентиляційних агрегатів, які не тільки забезпечують ефективну вентиляцію але й оптимізують використання енергії.

#### Інтерпретація результатів та їх апробація

Для перевірки обраної методики використано модельну ситуацію з приміщенням об'ємом  $50 \text{ м}^3$ , де через систему вентиляції та нещільності здійснювався контроль тиску. Сумарна площа нещільностей становила  $0.02 \text{ м}^2$ , що відповідає реалістичним умовам для середньостатистичного приміщення з мінімальними втратами через нещільності у герметизації. Задача полягала у забезпеченні стабільного позитивного тиску в  $+10 \text{ Па}$  всередині приміщення відносно атмосферного тиску зовні, що мінусує на  $10 \text{ Па}$ .

Результати аналізу показали, що для компенсації втрат повітря через нещільності та підтримання необхідного тиску, вентиляційна система повинна забезпечувати постійну витрату повітря на рівні приблизно  $0.053 \text{ м}^3/\text{с}$ . Цей показник було отримано на основі розрахунків, які враховують площу нещільностей, різницю тисків всередині та зовні приміщення, а також густину повітря.

Для створення порівняльної таблиці витрат на вентилятор до та після оптимізації системи вентиляції, яка враховує змінні витрати повітря протягом дня, було проведено заміри, що до оптимізації система працювала з високою витратою, необхідною для забезпечення максимального тиску, а після оптимізації система стала здатна адаптуватися до змін умов і потреб, зменшуючи загальні енергетичні витрати. На рис. 5 показано різницю в витратах на роботу ВУ до та після оптимізації, де червоний графік відповідає за витрати до оптимізації а жовтий за витрати після оптимізації. Одна поділка дорівнює  $0.05 \text{ кВт/год}$ .

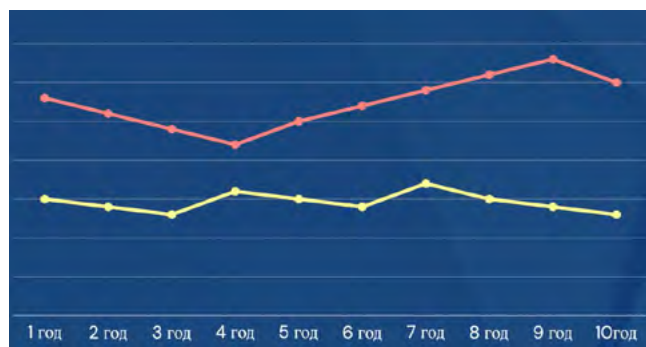


Рис. 5. Порівняльний графік витрат ВС до та після оптимізації



Нижче наведено порівняльну таблицю 1 з точними значеннями витрат ВС до та після оптимізації.

Таблиця 1

Порівняння витрат ВС до та після оптимізації

Година	Витрати до оптимізації (кВт·год)	Витрати після оптимізації (кВт·год)
1	0.28	0.15
2	0.26	0.14
3	0.24	0.13
4	0.22	0.16
5	0.25	0.15
6	0.27	0.14
7	0.29	0.17
8	0.31	0.15
9	0.33	0.14
10	0.3	0.13

На рис. 6 представлено графік результату роботи системи прогнозування швидкості вітру, що використовується для моніторингу та адаптації вітрових умов. Графік показує прогнозовану швидкість вітру з кроком у одну годину, надаючи уявлення про зміни вітрових умов.

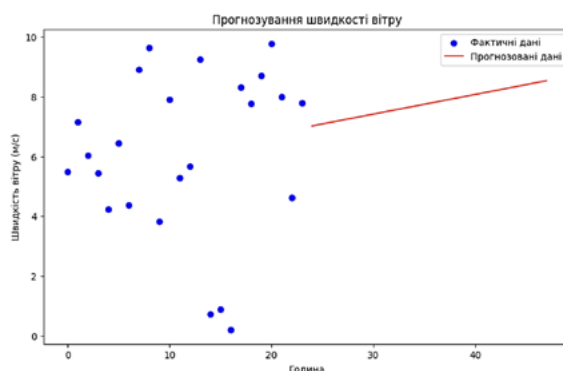


Рис. 6. Графік результату роботи системи стосовно швидкості вітру

На осі абсцис відображено час доби в форматі годин, що дозволяє легко ідентифікувати, у який час доби очікується зміна швидкості вітру. Вісь ординат показує швидкість вітру в метрах за секунду (м/с).

На рис. 7 зображено графік з результатом роботи системи щодо прогнозування напрямку вітру. Графік демонструє очікувані зміни напрямку вітру протягом наступних 24 годин, з інтервалом в одну годину.

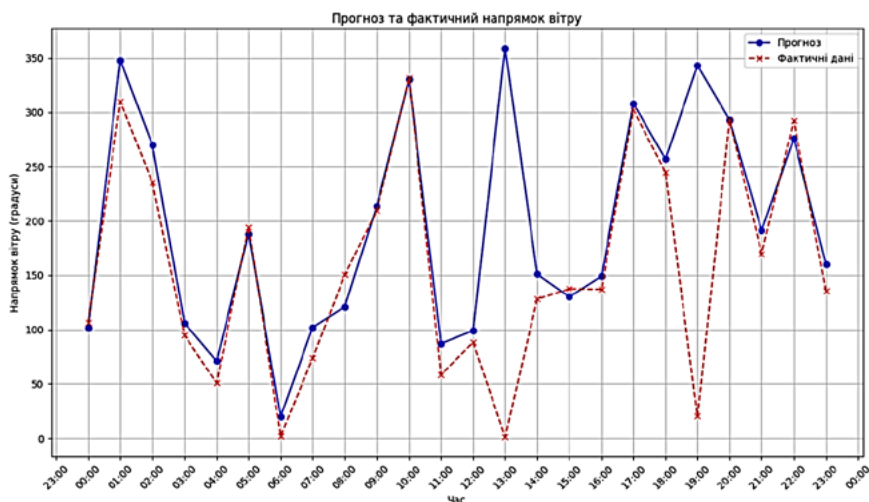


Рис. 7. Графік результату роботи системи стосовно напрямку вітру

Горизонтальна вісь показує час у годинах, що дозволяє легко визначити, коли протягом дня будуть відбуватися зміни в напрямку вітру. Вертикальна вісь представляє напрямок вітру у градусах від 0 до 360, де 0 градусів (або 360) означає північ, 90 градусів – схід, 180 градусів – південь, а 270 градусів – захід.

На рис. 8 видно результат прогнозування температури повітря.

На графіку зображено прогнозовану динаміку температури на наступні 24 години з годинним кроком. Вісь X відображає час у годинах, а вісь Y показує температуру в градусах Цельсія.

Для другої задачі, з умовою вентиляційної витрати в 1 м<sup>3</sup>/с, було розроблено модель, що демонструє динаміку змін тиску в приміщенні в часі. Результати моделювання вказують на те, що при такій витраті повітря можливе швидке досягнення необхідного рівня тиску, після чого система повинна регулювати подачу повітря для його підтримання.

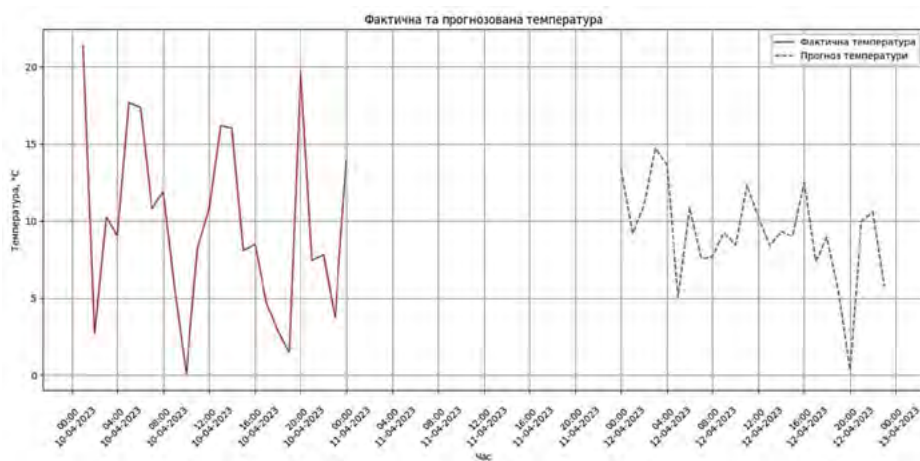


Рис. 8. Графік прогнозу температури повітря

**Основні припущення:**

- Витрата ВС стабільна.
- Об’єм приміщення (V) є заданим і не змінюється.
- Площа нещільностей (A) і коефіцієнт проникності (C) відомі.
- Зовнішній тиск залишається незмінним або його вплив може бути ігнорованим для спрощення розрахунків.

**Розрахунок:**

Для моделювання зміни тиску в приміщенні можна використати рівняння, що описує баланс маси повітря:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} (Q_{in} - Q_{out}), \tag{2}$$

- де  $\frac{dP}{dt}$  – зміна тиску в часі;
- газова стала для повітря;
- V – абсолютна температура повітря в середині приміщення;
- V – об’єм приміщення;
- $Q_{in}$  – витрата повітря, що подається вентилятором (1 м<sup>3</sup>/с);
- $Q_{out} = CA\sqrt{\Delta P}$  – витрата повітря, що виходить через нещільності.

Витрата повітря, що виходить, Q(out) може бути розрахована через коефіцієнт проникності нещільностей (неконтрольовані протічки НБК) і різницю тисків всередині і зовні приміщення:

$$Q_{out} = CA\sqrt{\Delta P}, \tag{3}$$

- де A – коефіцієнт проникності нещільностей;
- A – площа нещільностей;
- $\Delta P$  – різниця тисків всередині і зовні приміщення.

**Метод розв’язку:**

Це диференціальне рівняння можна розв’язати чисельно, використовуючи методи, такі як метод Ейлера або метод Рунге-Кутта, для отримання зміни тиску в часі.



Для цього потрібно задати початкові умови (наприклад, початковий тиск всередині приміщення) і крок за часом для ітерацій.

#### **Практичне застосування:**

Ця модель дозволяє аналізувати, як швидко ВС зможе досягти потрібного рівня тиску в НБК і як цей тиск буде підтримуватися або змінюватися в часі залежно від змін умов М.

Описані підходи та результати розрахунків демонструють ефективність використання розробленої методики для зміни підходів до управління ВС НБК контролю та управління станами.

Отримані дані можуть бути використані для оптимізації роботи ВС з метою економії енергії та забезпечення необхідних умов комфорту та безпеки в приміщеннях.

#### **Висновки**

1. Проаналізовано умови і фактори, що впливають на гідродинамічний стан повітря в НБК та вплив на нього обраних в роботі показників.

2. Розроблено генетичний алгоритм для інтелектуальної СПМЗ.

3. Запропоновано сама інтелектуальне СПМЗ на основі машинного навчання з підкріпленням на основі генетичних алгоритмів

4. Проведено експериментальні дослідження з метою розробки системи прогнозування та управління, яка опирається на методи машинного навчання. Система призначена для аналізу метеорологічних параметрів всередині та навколо конфайнменту з метою оптимізації роботи вентиляційних систем.

5. Впровадження розробленої системи прогнозування і керування дозволяє знизити споживання електроенергії ВС на 13% при незмінних показниках неорганізованих викидів РА.

6. У подальших дослідженнях планується детальніше вивчити вплив невизначеностей у вихідних даних на ефективність запропонованого методу, враховуючи можливі зміни в нещільностях конструкцій та розподіл тисків при різних метеорологічних умовах.

#### **Список використаної літератури**

1. Seem, J.E. (2007). «Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings». *Energy and Buildings*, 39(1), 52–58.

2. Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C.N., Morari, M., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., Morari, M. (2012). «Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control». *Energy and Buildings*, 45, 15–27.

3. Ma, Y., Borrelli, F., Hancey, B., Coffey, B., Bengea, S., Haves, P. (2011). «Model predictive control for the operation of building cooling systems». *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(3), 796–803.

4. Aswani, A., Master, N., Taneja, J., Culler, D., Tomlin, C. (2012). «Reducing Transient and Steady State Electricity Consumption in HVAC Using Learning-Based Model-Predictive Control». *Proceedings of the IEEE*, 100(1), 240–253.

5. Pysmennyu Y., Havrylko Y., Krukovskyi P., Starovit I., Diadiushko Y. Development of special mathematical software for management of ventilation units of the New Safe Confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Nuclear and radiation safety*. 2022, 2(94), C. 35–43.

6. Petro Loboda, Ivan Starovit, Oleksii Shushura, Yevhen Havrylko, Ventilation control of the New Safe Confinement of the CHNPP based on neuro-fuzzy networks. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2023. Vol. 13 (4). P. 114–118.

#### **References**

1. Seem, J.E. (2007). «Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings». *Energy and Buildings*, 39(1), 52–58.

2. Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C.N., Morari, M., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., Morari, M. (2012). «Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control». *Energy and Buildings*, 45, 15–27.

3. Ma, Y., Borrelli, F., Hancey, B., Coffey, B., Bengea, S., Haves, P. (2011). «Model predictive control for the operation of building cooling systems». *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(3), 796–803.

4. Aswani, A., Master, N., Taneja, J., Culler, D., Tomlin, C. (2012). «Reducing Transient and Steady State Electricity Consumption in HVAC Using Learning-Based Model-Predictive Control». *Proceedings of the IEEE*, 100(1), 240–253.

5. Pysmennyu Y., Havrylko Y., Krukovskyi P., Starovit I., Diadiushko Y. Development of special mathematical software for management of ventilation units of the New Safe Confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Nuclear and radiation safety*. 2022, 2(94), C. 35–43.

6. Petro Loboda, Ivan Starovit, Oleksii Shushura, Yevhen Havrylko, Ventilation control of the New Safe Confinement of the CHNPP based on neuro-fuzzy networks. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2023. Vol. 13 (4). P. 114–118.