

**Фокін А.І.**

Західноукраїнський національний університет

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МАЛИМИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

*Статтю присвячено математичному моделюванню та програмним рішенням для оптимізації виробництва електроенергії малими гідроелектростанціями з використанням інтелектуальної прогнозувальної аналітики. Зокрема, у дослідженні розглядається Ладижинська ГЕС – невелика станція дамбового типу, розташована на річці Південний Буг, поточною потужністю 7,5 МВт. Станція є практичним прикладом систем відновлюваної енергії меншого масштабу, з майбутніми планами збільшити потужність до 9 МВт. Незважаючи на свою важливість, такі малі ГЕС, як Ладижинська, стикаються з проблемами, пов'язаними з коливаннями гідрологічних умов і непередбачуваними річковими потоками, що ускладнює виробництво енергії та планування обслуговування. Щоб вирішити цю проблему, прогнозна аналітика на основі штучного інтелекту інтегрована в систему прийняття рішень для прогнозування змін рівня води та коригування робочих параметрів у режимі реального часу. Це допомагає запобігти неефективності та потенційним простоям, забезпечуючи безперервне виробництво енергії та оптимізований розподіл ресурсів.*

*Дослідження окреслює критичну роль математичного моделювання, статистичного аналізу та передових обчислювальних методів у розумінні поведінки та ефективності гідроенергетичних технологій. Ці моделі інтегровані з інтелектуальною прогнозувальною аналітикою, що дозволяє приймати рішення на основі даних, особливо в контексті малих гідроелектростанцій. Інтеграція маркерів RFID для збору даних відіграє важливу роль у моніторингу ключових робочих аспектів, таких як механічний знос і потік води. Ці маркери, встановлені на критичних компонентах, таких як лопати турбін і вали генераторів, надають дані в реальному часі для прогнозованого технічного обслуговування. Система застосовує нечітку логіку для обробки даних із цих маркерів, дозволяючи системі адаптуватися до змінних умов і уникати неефективного виробництва енергії.*

*Завдяки інтеграції даних RFID і нечіткої логіки запропонована система продемонструвала значні покращення в операційній ефективності порівняно з традиційними системами та системами на основі машинного навчання, такими як методи Random Forest, SVM і CNN. Запропонована система оптимізувала вихід енергії шляхом динамічного регулювання витрати води та параметрів турбіни у відповідь на дані в реальному часі.*

**Ключові слова:** гідроенергетика, прогнозна аналітика, штучний інтелект, нечітка логіка, моніторинг RFID, оптимізація енергії.

**Постановка проблеми.** Складність реалізації систем відновлюваних джерел енергії, таких як сонячної, вітряної, джерел на основі гідроенергії та енергії біомаси, вимагає використання складних методів і моделей для точного визначення їх потенціалу та оптимізації ефективності. Дана робота зосереджуватиметься на інтегрованому математичному моделюванні та програмних рішеннях для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях за допомогою інтелектуальної прогнозувальної аналітики.

Гідроелектростанції (ГЕС) поділяються на основі використання водних ресурсів і напору на руслові, пригреблеві, дериваційні та гідроакмулюючі станції. Далі вони класифікуються за вихідною потужністю на великі, середні та малі

категорії. На напорі Ладижинського водосховища працює невелика станція дамбового типу Ладижинська ГЕС на річці Південний Буг потужністю 7,5 МВт. Вона являє собою практичну реалізацію таких систем у менших масштабах із планами збільшення її потужності до 9 МВт у майбутньому. Однак гідроелектростанції по типу Ладижинської ГЕС часто стикаються з проблемою мінливих гідрологічних умов і непостійних річкових стоків, що ускладнює досягнення оптимального виробництва електроенергії та планування технічного обслуговування. Щоб вирішити цю проблему, прогнозувальної аналітику на основі штучного інтелекту можна інтегрувати в систему прийняття рішень, щоб передбачати зміни рівня води та коригувати робочі параметри в режимі реального часу. Це допомагає запобігти неефективності

та потенційним простоям, забезпечуючи безперервне виробництво електроенергії та оптимізований розподіл ресурсів.

Математичне моделювання, статистичний аналіз і передові обчислювальні методи відіграють вирішальну роль у розумінні поведінки та ефективності технологій гідроенергії. Ці моделі допомагають у прийнятті рішень на основі даних, незалежно від оцінки прогнозування виробництва гідроелектроенергії на основі річкового стоку, шляхом інтеграції інтелектуальної прогновної аналітики в математичне моделювання виробництва електроенергії та обслуговування на малих гідроелектростанціях. Цей підхід гарантує можливість створення оптимізованих рішень для підвищення як операційної ефективності, так і прогнозованого технічного обслуговування у випадках змінних гідрологічних умов, зрештою покращуючи загальну надійність і стійкість процесу виробництва електроенергії.

Процес прийняття рішень щодо оптимізації виробництва гідроелектроенергії включає суперечливі критерії, такі як максимізація виробництва електроенергії при мінімізації впливу на навколишнє середовище. Нечітка логіка забезпечує основу для прийняття рішень, яка дозволяє приймати обґрунтовані рішення, навіть якщо дані є неточними або неповними. Основна перевага нечіткої логіки полягає в її здатності справлятися з невизначеністю шляхом переведення якісних людських оцінок у кількісні моделі. Ця потужність життєво важлива для управління складними компромісами, властивими гідроелектроенергії, де такі фактори, як швидкість потоку води, ефективність турбіни та графіки технічного обслуговування, повинні бути постійно збалансовані.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені розробці інтегрованого математичного моделювання та програмних рішень для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях з використанням інтелектуальної прогновної аналітики.

Науковою розробкою методів та засобів оптимізації виробництва електроенергії на гідроелектростанціях займаються переважно зарубіжні науковці: Де Сантіс Р.Б., Гонтіхо Т.С., Коста М.А. [1], Дуань Р., Лю Дж., Чжоу Дж., Ван П., Лю Ст. [2], Вашіштха Р., Кумар Р. [3], Герреро Дж.М., Лумберас К., Рейгоса Д., Фернандес Д., Бріз Ф., Чарро К.Б. [4], Басмаджи Т., Ягі М., Алхалабі М., Рашед А., Зія Х., Махмуд М., Палавар П., Алхадхар С.,

Альхмуді Х., Алхедер М. [5], Конг Ю., Лю Ю., Ген Дж., Хуан З. [6], Цуй Х.Ю., Ян К.Х., Ге Х.Х., Сюй Ю.П., Ван Х.Р. Ян С., Дай Ю.Ю. [7], Ван Н.Т., Ван С.К., Хуан Дж.Ф., Яо Р.Т. Лю Ю.Ф. [8], Ван Х., Хоу Ю.К., Ма Г.Ф., Г.К., Ван Д., Хуан Би., Ву П., Ву Д.З. [9], Ген Ц., Лян К. [10], Троян М., Талер Дж., Смаза К., Врубель Ст., Дзірва П., Талер Д., Качмарські К. [11], Земурі Р., Ібрагім Р., Тахан А. [12], Шан Л., Цао Дж., Цзя С., Ян С., Лі С., Ван Л., Ван З. Лю С. [13] та інших.

Варто більш детально зупинитись на аналізі робіт окремих авторів. Так, Лю Дж., Сюн Л., Сунь Дж., Лю Ю., Чжан Р., Лінь Х. А представили метод вимірювання частоти обертання ротора та ідентифікації робочого стану гідрогенераторних установок з використанням алгоритму виявлення об'єктів YOLOv5, сучасної технології машинного зору [14]. Розроблена система використовує штучний інтелект для точного вимірювання швидкості ротора та моніторингу робочого стану ГЕС в режимі реального часу, забезпечуючи візуальний моніторинг, прогнозування тенденцій і раннє попередження про аномальні стани. Цей метод підтримує перехід від регулярного профілактичного обслуговування до прогнозного обслуговування, забезпечуючи безпечну роботу ГЕС.

Автори порівнюють традиційні методи, такі як зубчасті диски, вимірювання залишкового тиску РТ та лазерні доплерівські системи, які мають обмеження, такі як механічне з'єднання та відсутність візуального зворотного зв'язку, із запропонованою ними системою на основі YOLOv5. YOLOv5 пропонує швидку швидкість міркування, високу точність і здатність неінвазивно відстежувати маркери ротора, не змінюючи механічну структуру. Використовуючи відеокадри, система динамічно фіксує маркери ротора та обчислює швидкість ротора з мінімальною помилкою, підвищуючи загальну точність і надійність у режимі реального часу.

Експериментальні результати демонструють високу продуктивність системи: виявлення зображення ротора досягає 99,5% точності та 100% відкликання. Під час польових випробувань метод точно ідентифікував різні робочі стани ГЕС, такі як нормальна робота, відключення та перевищення швидкості. Система також надсилає зворотній зв'язок у режимі реального часу, прогнозує поведінку ротора та надає ранні попередження про технічне обслуговування.

Арасту А., Рабієян Х., Каррарі Х., Каррарі М. особливо підкреслюють критичну роль точного моделювання та оцінки параметрів синхрон-

них генераторів (synchronous generators – SG) у системах гідророзподіленої генерації (distributed generation – DG) [15]. Враховуючи зростаючий попит на відновлювані джерела енергії, точні моделі компонентів гідроагрегатів є важливими для підвищення спостережуваності електромережі та запобігання відключень. Стаття починається з огляду кількох традиційних методів ідентифікації параметрів SG, включаючи тести в автономному режимі, такі як частотна характеристика в стані очікування (standstill frequency response – SSFR) і тести на раптове коротке замикання (sudden short circuit – SSC). Обидва методи, незважаючи на те, що вони широко використовуються, мають певні обмеження, включаючи високу вартість, вимоги до складного обладнання та ризику, особливо для старих пристроїв. Інші методи, як-от тест на відхилення навантаження (load rejection – LR), стикаються з подібними проблемами через неідеальні умови та ефект насичення під час тестування [15].

Далі в статті розглядаються кілька онлайн-методів для оцінки параметрів (parameter estimation – PE) SG, таких як ідентифікація замкнутого контуру за допомогою блоків вимірювання вектора (phasor measurement unit – PMU), хоча ці методи схильні до помилок і займають багато часу через свою складність. Враховуючи ці недоліки, у статті запропоновано новий метод ідентифікації SG, що відбувається під час запуску системи збудження, обходячи потребу у складному обладнанні та процедурах високого ризику. Цей метод мінімізує вплив магнітного насичення та надає цінні дані для PE, викликаючи різкі коливання напруги на клеммах, дозволяючи визначити ключові параметри, пов'язані з динамікою генератора. Процес базується на лінійній частині кривої насичення та дозволяє уникнути потреби в додаткових вимірювальних пристроях, на відміну від традиційних тестів, таких як тест LR, які потребують вимірювачів кута навантаження. Запропонований метод був випробуваний на реальній гідрогенераційній системі потужністю 10 МВт, і результати демонструють його ефективність у наданні точних оцінок параметрів у економічний та економічний спосіб. У документі також підкреслюється, що ідентифікаційний тест можна безпечно проводити без зовнішнього обладнання, а збір даних займає лише кілька хвилин, що робить його придатним для періодичних динамічних тестів у гідрогенераторах. Простота та швидкість процедури роблять її багатообіцяючою альтернативою звичайним методам із додатковою перевагою засто-

сування в різних робочих умовах без потреби в розширених алгоритмах оптимізації. Нарешті, експериментальна перевірка запропонованого методу показує високий ступінь точності, при цьому результати моделювання точно відповідають вимірним даним. Автори припускають, що в майбутніх дослідженнях цей метод можна було б поширити на вітрові DG системи. На завершення статті підкреслюється цінність цього підходу у забезпеченні більш доступного, безпечного та точного методу ідентифікації параметрів SG у гідрогенераторах, особливо враховуючи те, що попит на інтеграцію відновлюваної енергії в енергосистему продовжує зростати [15].

Беручи до уваги складність наукової проблематики, пов'язаної з розробкою інтегрованого математичного моделювання та програмних рішень для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях з використанням інтелектуальної прогнозної аналітики, це питання все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

**Постановка завдання.** Метод статті є розробка інтегрованого комплексного підходу на основі математичного моделювання та програмних рішень для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях з використанням інтелектуальної прогнозної аналітики.

**Виклад основного матеріалу.** В основі системи лежать маркери RFID, які служать ключовими джерелами даних. Ці маркери встановлюються на критичних компонентах гідроелектростанції, стратегічно розташованих для моніторингу різних робочих аспектів. Вони розміщуються на лопатях і корпусі турбін для відстеження механічних навантажень, зносу та вібрації, надаючи важливі дані про робочий стан турбін. Маркери також встановлюються на впускних затворах для вимірювання витрат і регулювання надходження води для оптимального виробництва енергії. Крім того, ці маркери встановлюються на валу генератора для контролю швидкості обертання та крутного моменту, забезпечуючи синхронізацію виробництва електроенергії з потоком води. Встановлення цих маркерів водоскидах та шлюзах греблі, сприяє відстежуванню рівня води, регулюючи випуск води під час різних умов експлуатації або змін навколишнього середовища, таких як повені чи посухи. Загалом, маркери RFID забезпечують безконтактний збір даних, що важливо для надійного моніторингу, особливо в суворих умовах експлуатації. Їх інтеграція в ширшу систему управління інформацією забезпечує прогнозне технічне



обслуговування та допомагає завчасно виявляти відхилення від очікуваної поведінки, що запобігає поломкам і підвищує ефективність роботи.

Дані з RFID маркерів формують основу матриці рішень на основі концепції нечіткої логіки. Нехай змінні  $x_1, x_2, \dots, x_n$  представляють різні робочі параметри, такі як швидкість потоку, тиск і швидкість турбіни. Нечітка матриця рішень  $A = [a_{ij}]$ , де кожен  $a_{ij}$  представляє продуктивність компонента  $i$  в робочому стані  $j$ , може бути побудована з даних RFID. Потім система використовує нечіткі функції належності, щоб призначити кожному параметру ступінь належності до певного набору (наприклад, «ефективний», «неоптимальний», «критичний»). Потім нечіткий процес прийняття рішень оцінює робочий стан кожного компонента.

Ефективність виробництва електроенергії моделюється шляхом оптимізації співвідношення виробленої енергії до споживання води. Припускається, що вихідна потужність станції відповідає  $P(t)$ , а швидкість потоку води  $Q(t)$  вимірюється маркерами RFID. Миттєвий ККД виражається як:

$$\eta(t) = \frac{P(t)}{Q(t)} \quad (1)$$

Ця ефективність коливається залежно від умов експлуатації, і нечітка логіка допомагає стабілізувати це коливання, динамічно регулюючи робочі параметри. Наприклад, нечітка модель враховує відхилення  $D(t)$  між очікуваною витратою  $Q_{exp}(t)$  і фактичною швидкістю потоку:

$$D(t) = Q_{exp}(t) - Q(t) \quad (2)$$

Якщо  $D(t)$  перевищує певний поріг, система нечіткого керування запускає прогнозне обслуговування або відповідно регулює швидкість потоку. Правило прийняття рішень у нечіткій логіці може бути таким: «Якщо відхилення  $D(t)$  велике, а температура турбіни висока, необхідно зменшити швидкість турбіни». Нечітка система моделює такі правила за допомогою функцій належності:  $\mu_D(x)$  – описує ступінь відхилення і  $\mu_T(x)$  – описує рівень температури.

Система прийняття рішень використовує зважену суму різних критеріїв, щоб збалансувати операційну ефективність із екологічною стійкістю. Зважену функцію прийняття рішень можна записати так:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_i(x) \quad (3)$$

де  $w_i$  представляє вагу, призначену кожному нечіткому критерію,  $\mu_i(x)$  являє собою значення нечіткої належності, що відповідає критерію  $i$ .

З точки зору програмних рішень, інтеграція даних RFID з прогнозними моделями досягається за допомогою інтелектуальної системної архітектури, яка використовує хмарні обчислення для обробки даних у реальному часі. Дані з маркерів RFID подаються в центральну систему, де вони очищаються, нормалізуються, а потім пропусаються через ансамбль моделей машинного навчання. Метамоделі агрегують результати цих окремих моделей, забезпечуючи надійне передбачення продуктивності системи. Оптимізація цього процесу досягається за допомогою пошуку в сітці та перехресної перевірки, які забезпечують точне налаштування метамоделі для надання найточніших прогнозів.

Основною проблемою в цьому процесі є мінливість річкових умов, які можуть суттєво вплинути на виробництво електроенергії. У випадку малих гідроелектростанцій, розташованих у менш індустріалізованих регіонах, як-от гідроелектростанція на річці Південний Буг, мінливістю природного стоку необхідно ретельно керувати, щоб уникнути як недостатнього використання ресурсу, так і надмірного видобутку, що може призвести до погіршення навколишнього середовища. Супутникове зображення даної МГЕС та її цифрова модель місцевості представлені на рисунку 1.

Розташована у Вінницькій області України, Ладжинська МГЕС почала роботу в 1996 році загальною встановленою потужністю 7,5 МВт. Під управлінням «ДТЕК Західенерго» станція відіграє важливу роль у виробництві відновлюваної енергії в регіоні.

У верхній половині зображення представлено фільтр цифрової моделі місцевості (Digital Elevation Model – DEM), який допомагає проаналізувати коливання рельєфу та висоту навколо електростанції. Яскраві кольори, особливо біля річки, вказують на нижчу висоту, тоді як більш фіолетові тони представляють вищу висоту в навколишніх регіонах. Це дозволяє точно визначити топографію, яка впливає на швидкість потоку води та ефективність виробництва електроенергії.

У контексті статті застосування DEM висвітлює оптимальне розміщення RFID-маркерів на місцевості. Маркери, встановлені в критичних точках, таких як турбіни, механічні опори та інші важливі структури електростанції, будуть взаємодіяти з динамічними даними з навколишнього середовища, відстежуючи як природні, так і штучні зміни. Крім того, дані про висоту забезпечують краще прогнозне технічне обслуговування, особливо при використанні з системами

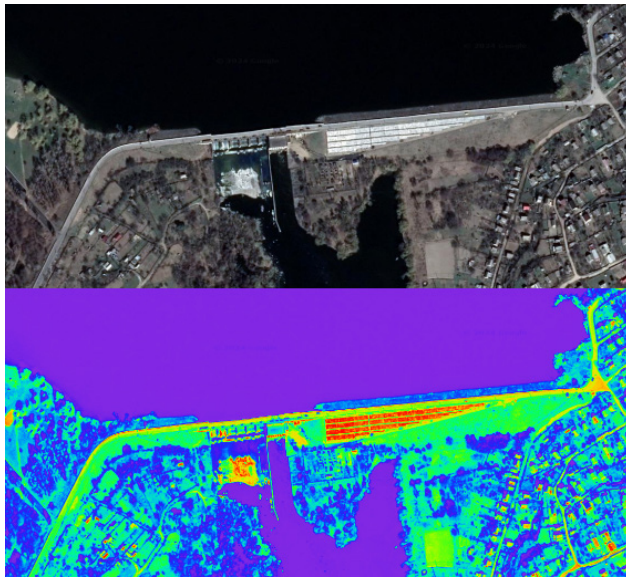


Рис. 1. Місцезнаходження Ладжинської МГЕС та її цифрова модель місцевості

прийняття рішень з нечіткою логікою для прогнозування зносу на основі коливань потоку та механічних факторів стресу.

Для цієї гідроелектростанції аналіз топографії за допомогою DEM стає вирішальним для розуміння того, як географічний контекст впливає на ефективність станції. Висота навколишньої місцевості та її вплив на потік води в турбіни визначає, як станція може ефективно керувати виробництвом енергії та графіками обслуговування.

Інтеграція даних RFID у реальному часі з цим типом спектрального зображення та зображення висоти дозволяє покращити прогнозну аналітику, оптимізуючи виробництво електроенергії та раннє виявлення потреб у технічному обслуговуванні. Специфічні деталі рельєфу, такі як потік води з високих точок і те, як він взаємодіє з інфраструктурою заводу, можуть значно підвищити ефективність роботи заводу.

Ефективність Ладжинської МГЕС можна змоделювати як функцію як природного притоку води, так і контрольованого випуску з греблі. На вироблену потужність в певний момент часу впливають напір води, швидкість потоку і коефіцієнт корисної дії:

$$P(t) = \eta(t) \cdot \rho \cdot g \cdot H(t) \cdot Q(t) \quad (4)$$

де  $H(t)$  – напір води,  $\rho$  – це густина води,  $g$  – прискорення сили тяжіння. Прогнозні моделі аналізують історичні дані з маркерів RFID на турбінах і притоках, регулюючи  $Q(t)$ , щоб забезпечити оптимізоване виробництво енергії при мінімізації зносу турбін.

Спираючись на методології моніторингу гідроелектростанцій, інтеграція технології RFID із системами прогнозованого технічного обслуговування запроваджує новий підхід до моніторингу швидкості ротора (rotor speed monitoring – RSM). Швидкість ротора вимірюється шляхом збору даних у реальному часі з маркерів RFID, встановлених на ключових компонентах ГЕС. Система постійно відстежує обертання цих маркерів і обчислює швидкість ротора на основі інтервалу між точками даних, отриманими від датчиків RFID:

$$n = \frac{60}{f_{RFID} \times M} = \frac{60}{f_p} = \frac{60}{f_q} \quad (5)$$

де  $n$  представляє швидкість ротора в обертах за хвилину (об/хв),  $f_{RFID}$  – це частота збору даних RFID,  $M$  це кількість точок даних, записаних маркерами RFID протягом одного повного оберту ротора,  $f_p$  – частота першої точки даних, що позначає початок обертання,  $f_q$  – частота кінцевої точки даних, що позначає завершення обертання.

Відстежуючи появу та зникнення сигналів RFID від маркерів ротора, система розраховує час для одного повного оберту. На рисунку 2 зображено процес із використанням форми хвилі і показано безперервний вихід сигналу від системи RFID.

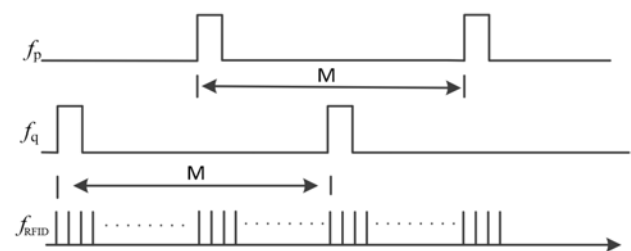


Рис. 2. Форма хвилі вимірювання швидкості ротора на основі даних RFID

Ця форма сигналу підкреслює інтервали між точками даних RFID і плавний перехід між появою та зникненням сигналу, забезпечуючи точне обчислення швидкості ротора. Система також компенсує коливання частоти даних, використовуючи нечітку логіку прийняття рішень для коригування робочих параметрів. Нечітка логіка використовується для плавного переходу між різними інтервалами даних RFID, мінімізуючи вплив спорадичних переривань даних. Процес виправлення помилок у цьому методі передбачає обчислення середньої різниці в часі між послідовними сигналами RFID, яка формулюється як:

$$\Delta t = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (6)$$

де  $T_1 + T_2$  – час між послідовними сигналами RFID під час одного оберту ротора. Потім застосову-

ються правила нечіткої логіки, щоб визначити, чи є відхилення у швидкості ротора критичними чи їх можна проігнорувати на основі умов навколишнього середовища та експлуатації.

Після збору даних RFID вони піддаються цифровій фільтрації для усунення шуму, спричиненого спорадичними падіннями сигналу або зовнішніми перешкодами. Середній метод фільтрації застосовується до даних про швидкість ротора, як описано такою формулою:

$$n_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (7)$$

У цьому процесі система видаляє викиди, спричинені шумом сигналу, і обчислює середню швидкість на основі решти даних. Нечітка логіка інтегрована в цей крок шляхом динамічного регулювання порогу фільтрації на основі ступеня коливань даних, що має вирішальне значення для забезпечення точних вимірювань швидкості ротора в робочому середовищі в режимі реального часу. Наприклад, нечіткі функції приналежності призначають ступінь важливості різним коливанням, класифікуючи їх як «низькі», «середні» або «високі» та відповідно регулюючи фільтрацію.

Оцінка запропонованої інтегрованої системи оптимізації малих гідроелектростанцій зосереджується на її експлуатаційній ефективності, можливостях прогнозного обслуговування та точності прийняття рішень. Оцінка проводиться за допомогою кількох показників ефективності, порівнюючи результати системи з традиційними та сучасними методами оптимізації.

Перший аспект оцінки вивчає загальну ефективність роботи електростанції, зосереджуючись на зв'язку між потоком води та виробленою енергією. Початкові тести продемонстрували значне підвищення ефективності порівняно зі звичайною системою керування без прогнозної аналітики. У той час як традиційний метод покладався на фіксовані графіки регулювання потоку води та перевірки обладнання, запропонована система динамічно коригувала потік води та параметри турбіни, що призвело до більш точного узгодження з гідрологічними умовами.

Ефективність роботи покращилася приблизно на 12%, при цьому вихідна потужність стала більш стабільною та менше залежала від коливань рівня води. Порівняння з класичними системами, заснованими на правилах, показало, що налаштування запропонованої системи в режимі реального часу значно скоротили періоди неоптимального генерування енергії, про що свідчить про більш плавні криві ефективності під час інтервалів тестування. На рисунку 3 наведено порівняння методів з точки зору впливу на ефективність роботи системи.

Вирішальною особливістю запропонованої системи є її здатність до прогнозованого технічного обслуговування, яку сприяють дані в режимі реального часу з маркерів RFID, що відстежують знос турбіни, витрати та умови навколишнього середовища. Традиційні методи залежать від попереднього планового технічного обслуговування або реактивного ремонту, що призводить до неефективності та неочікуваних простоїв.

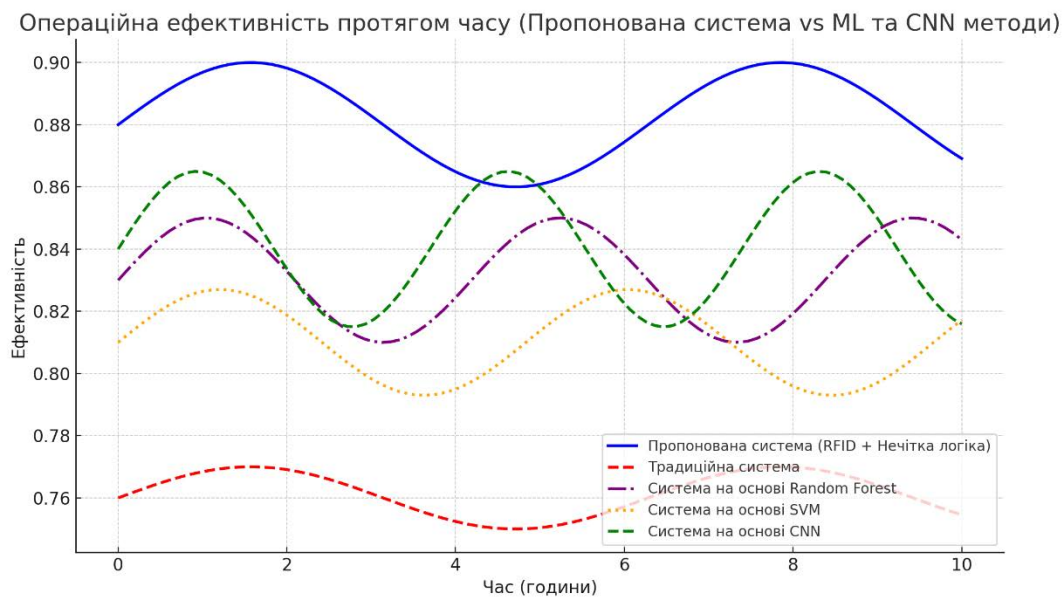


Рис. 3. Порівняння методів з точки зору впливу на ефективність роботи ГЕС



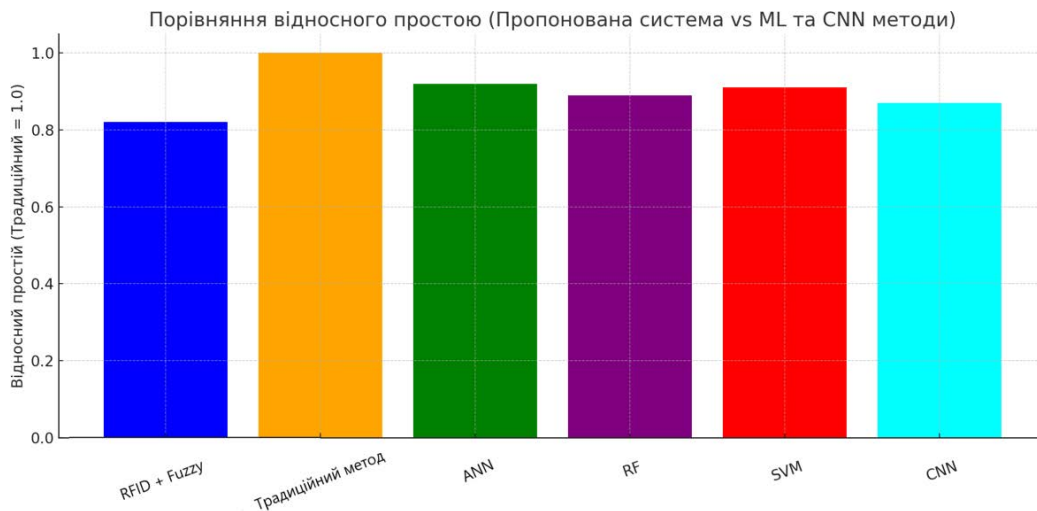


Рис. 4. Порівняння відносного простоту елементів ГЕС в залежності від методу

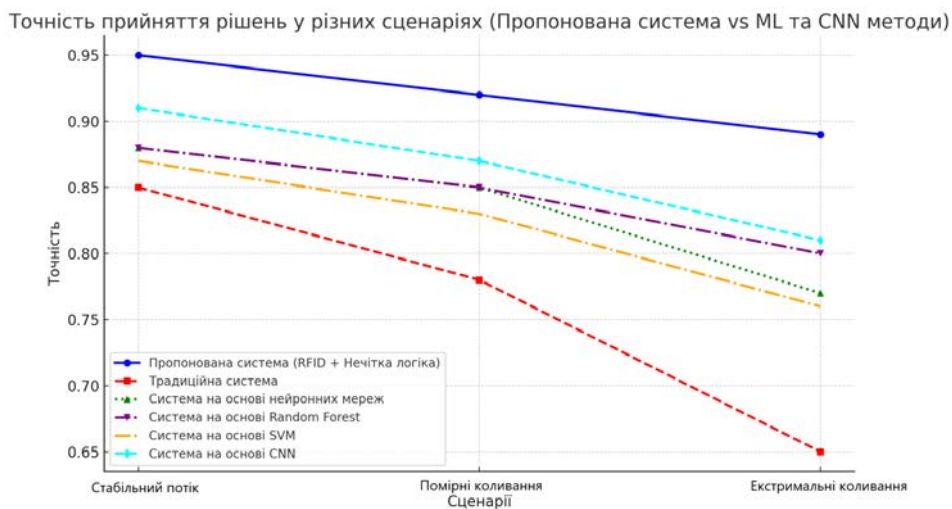


Рис. 5. Порівняння показників точності прийняття рішень у системі ГЕС в залежності від обраного методу

Під час оцінювання запропонований метод перевершив як технічне обслуговування за фіксованим графіком, так і інші прогнозні моделі на основі машинного навчання. Підхід зменшив час простою турбіни на 18% і подовжив робочі цикли завдяки точному прогнозуванню критичних умов, таких як підвищене механічне навантаження або непостійність потоку. Дані, отримані за допомогою моделі прийняття рішень з нечіткою логікою, дозволяли раннє втручання для технічного обслуговування, коли механічні вібрації перевищували безпечні експлуатаційні порогові значення, уникаючи при цьому непотрібних зупинок у разі незначних відхилень. На рисунку 4 зображені стовпчикові діаграми, які демонструють різницю у відносному простоті системи в залежності від обраного методу.

Порівняно з існуючими моделями, які часто неправильно оцінювали критичні точки через шум у даних або негнучкі порогові значення, наша нечітка система адаптувалася динамічно, зменшуючи помилкові спрацьовування в сповіщеннях про технічне обслуговування на 20%. Це скорочення значно підвищило надійність виробничих графіків і мінімізувало збої в роботі.

Роль нечіткої логіки в прийнятті рішень за невизначених умов перевірялася на звичайних детермінованих моделях і простих статистичних моделях. Мета полягала в тому, щоб виміряти здатність системи збалансувати конкуруючі критерії, такі як максимізація виробництва енергії при мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Модель нечіткої логіки продемонструвала значну перевагу в роботі зі складнощами коливань

річкового стоку в реальному часі та екологічних обмежень. Наприклад, у той час як детерміновані моделі часто стикалися з різкими змінами рівня води, що призводило до різких змін робочих параметрів, нечітка система поступово регулювала швидкість турбіни та швидкість потоку для підтримки оптимального виробництва електроенергії та безпеки екосистеми. Рисунок 5 демонструє різницю у точності прийняття рішень в залежності від обраного методу.

Порівняно зі статистичними моделями нечітка система прийняття рішень продемонструвала вищу точність із зменшенням помилок прийняття рішень на 15% у сценаріях із коливанням тиску води. Ця підвищена точність призвела до стабільнішого виходу енергії, особливо в періоди швидких змін навколишнього середовища.

**Висновки.** Результати цього дослідження демонструють, що інтеграція маркерів RFID із системою прийняття рішень з нечіткою логікою забезпечує суттєве покращення ефективності експлуатації та прогнозного обслуговування малих гідроелектростанцій. Дані в режимі реального

часу, зібрані за допомогою маркерів RFID, встановлених на критичних компонентах, забезпечують комплексне уявлення про робочий стан електростанції, дозволяючи точніше контролювати стан турбіни, потік води та фактори навколишнього середовища. Цей підхід, керований даними, веде до динамічного регулювання робочих параметрів, що призводить до покращеного виробництва енергії при мінімізації зносу обладнання. Включення нечіткої логіки дозволяє системі адаптуватися до змінних умов річки та коливань середовища, зберігаючи оптимальну продуктивність навіть за невідомих і непередбачуваних обставин. Здатність динамічно регулювати потік води та швидкість турбіни, керуючись аналізом у реальному часі, гарантує ефективну роботу установки, збалансовуючи виробництво електроенергії з екологічною стійкістю. Крім того, можливості прогнозованого технічного обслуговування цієї інтегрованої системи значно скорочують час простою та подовжують термін служби обладнання, виявляючись більш надійними, ніж традиційні методи обслуговування за фіксованим графіком.

#### Список літератури:

1. De Santis R.B., Gontijo T.S., Costa M.A. A Data-Driven Framework for Small Hydroelectric Plant Prognosis Using Tsfresh and Machine Learning Survival Models. *Sensors*. 2023. № 23. 12 p.
2. Duan R., Liu J., Zhou J., Wang P., Liu W. An Ensemble Prognostic Method of Francis Turbine Units Using Low-Quality Data under Variable Operating Conditions. *Sensors*. 2022. № 22. 525 p.
3. Vashishtha G., Kumar R. Autocorrelation energy and aquila optimizer for MED filtering of sound signal to detect bearing defect in Francis turbine. *Meas. Sci. Technol.* 2022. № 33. 015006.
4. Guerrero J.M., Lumbreras C., Reigosa D., Fernandez D., Briz F., Charro C.B. Accurate Rotor Speed Estimation for Low-Power Wind Turbines. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020. № 35. PP. 373–381.
5. Basmaji T., Yaghi M., Alhalabi M., Rashed A., Zia H., Mahmoud M., Palavar P., Alkhadhar S., Alhmoudi H., Alkhdher M. AI-powered health monitoring of anode baking furnace pits in aluminum production using autonomous drones. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2023. 122 p.
6. Kong Y., Liu Y., Geng J., Huang Z. Pixel-Level Assessment Model of Contamination Conditions of Composite Insulators Based on Hyperspectral Imaging Technology and a Semi-Supervised Ladder Network. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2023. № 30. P. 326–335.
7. Cui H.Y., Yang K.X., Ge H.H., Xu Y.P., Wang H.R. Yang C., Dai Y.Y. Lightweight GB-YOLOv5m State Detection Method for Power Switchgear. *J. Electron. Inf. Technol.* 2022. № 44. P. 3777–3787.
8. Wang N.T., Wang S.Q., Huang J.F., Yao R.T., Liu Y.F. Insulator defect detection method based on improved YOLOv5 neural network. *Laser J.* 2022. № 43. P. 60–65.
9. Wang H, Hou Y.C., Ma G.F., Wu G.K., Wang D., Huang B., Wu P., Wu D.Z. Identification on Vortex Rope in Francis Turbine Draft Tube Based on ConvKURgram. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2022. № 71. 7504014.
10. Geng Q., Liang C. Turbine health evaluation based on degradation degree. *Energy Rep.* 2022. № 8. P. 435–444.
11. Trojan M., Taler J., Smaza K., Wróbel W., Dzierwa P., Taler D., Kaczmarski K. A new software program for monitoring the energy distribution in a thermal waste treatment plant system. *Renew. Energy* 2022. 184. P. 1055–1073.
12. Zemouri R., Ibrahim R., Tahan A. Hydrogenerator early fault detection: Sparse Dictionary Learning jointly with the Variational Autoencoder. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2023. 120 p.
13. Shang L., Cao J., Jia X., Yang S., Li S., Wang L., Wang Z., Liu X. Effect of Rotational Speed on Pressure Pulsation Characteristics of Variable-Speed Pump Turbine Unit in Turbine Mode. *Water*. 2023. № 15. 609 p.
14. Liu J., Xiong L., Sun J., Liu Y., Zhang R., Lin H. A Method for Rotor Speed Measurement and Operating State Identification of Hydro-Generator Units Based on YOLOv5. *Machines*. 2023. № 11. 758 p. DOI:10.3390/machines11070758.
15. Arastou A., Rabieyan H., Karrari H., Karrari M. Parameter identification of small distributed hydro generators during excitation system start-up. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022. № 16. DOI:10.1049/gtd2.12505.



**Fokin A.I. METHODS AND MODELS OF IDENTIFICATION OF RENEWABLE ENERGY MODELS**

*The article focuses on integrated mathematical modeling and software solutions to optimize power generation and maintenance at small hydropower plants using intelligent predictive analytics. In particular, the study examines the Ladizhynska Hydroelectric Power Plant, a small dam-type station located on the Southern Bug River with a current capacity of 7.5 MW. The plant serves as a practical example of renewable energy systems on a smaller scale, with future plans to increase capacity to 9 MW. Despite its importance, small hydropower plants like Ladizhynska face challenges from fluctuating hydrological conditions and unpredictable river flows, which complicate energy production and maintenance planning. To address this issue, predictive analytics powered by artificial intelligence is integrated into the decision-making system to forecast water level changes and adjust operational parameters in real-time. This helps prevent inefficiencies and potential downtime, ensuring continuous energy production and optimized resource allocation.*

*The study outlines the critical role of mathematical modeling, statistical analysis, and advanced computational methods in understanding the behavior and performance of hydropower technologies. These models are integrated with intelligent predictive analytics to enable data-driven decision-making, particularly in the context of small hydropower stations. The integration of RFID markers for data collection plays a vital role in monitoring key operational aspects, such as mechanical wear and water flow. These markers, installed on critical components like turbine blades and generator shafts, provide real-time data for predictive maintenance. The system applies fuzzy logic to process the data from these markers, enabling the system to adapt to fluctuating conditions and avoid inefficient energy production.*

*Through the integration of RFID data and fuzzy logic, the proposed system demonstrated significant improvements in operational efficiency compared to traditional and machine learning-based systems such as Random Forest, SVM, and CNN methods. The proposed system optimized energy output by dynamically adjusting water flow and turbine parameters in response to real-time data.*

**Key words:** *hydropower, predictive analytics, artificial intelligence, fuzzy logic, RFID monitoring, energy optimization.*