

В. І. Роман, канд. техн. наук; М. І. Бугайчук

МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У ЗАДАЧАХ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

Наукова стаття присвячена огляду способів отримання та оцінювання навчальних даних для методів машинного навчання в задачах вимірювання витрати. Встановлено, що впровадження методів машинного навчання у сферу вимірювання витрати плинних середовищ потребує наявності репрезентативних, фізично достовірних та об'ємних наборів навчальних даних. Адже ефективність штучних нейронних мереж та алгоритмів оптимізації безпосередньо залежить від якості вхідної вибірки, що описує складні гідродинамічні процеси, особливо в умовах спотворень структури вимірюваного потоку. Систематизувавши наявні підходи до генерації навчальних даних для задач витратометрії та виконавши порівняльний аналіз їх ефективності, авторами виокремлено і детально розглянуто три ключові способи отримання навчальних даних для методів машинного навчання: експериментальні дослідження (висока достовірність, але обмежена варіативність), CFD-моделювання (дозволяє відтворити тривимірну структуру потоку з високою деталізацією) та суперпозиція аналітичних профілів (забезпечує швидку генерацію математичних моделей спотворень). Авторами встановлено, що для задач реконструкції профілю швидкості та передбачення витрати в багатоканальних хордових ультразвукових витратомірах найбільш раціональним є поєднання CFD-моделювання з експериментальними даними. Це забезпечує максимальну фізичну відповідність навченої моделі реальним умовам. Натомість для задач багатокритеріальної оптимізації конструкції хордових ультразвукових витратомірів (наприклад, із застосуванням генетичних алгоритмів) пріоритетними є CFD-моделі та суперпозиція профілів через їх здатність повноцінно описувати структуру спотвореного потоку у будь-якій точці перерізу. У статті запропоновано диференційований підхід до оцінювання отриманих навчальних даних за двома групами критеріїв: група для CFD-моделювання та суперпозиція аналітичних профілів – гідродинамічний коефіцієнт, відносна похибка вимірювання витрати, коефіцієнт чутливості до варіацій; група для CFD-моделювання та експериментів – коефіцієнти профілю, симетрії та поперечності. Виявлено, що коефіцієнт профілю є ключовим інформативним параметром для ідентифікації типу гідродинамічного спотворення.

Ключові слова: машинне навчання, навчальні дані, профіль швидкості потоку, CFD-моделювання, суперпозиція аналітичних профілів, ультразвукові витратоміри, критерії оцінювання.

Актуальність та мета досліджень

Згідно схваленої в грудні 2020 року Кабінетом Міністрів України Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні, впровадження інформаційних технологій, частиною яких є технології штучного інтелекту, є невід'ємною складовою розвитку соціально-економічної, науково-технічної, оборонної, правової та іншої діяльності у сферах загальнодержавного значення. Реалізація Концепції передбачена на період до 2030 року, і одними із пріоритетних сфер, в яких мають бути реалізовані завдання державної політики розвитку галузі штучного інтелекту, зокрема, є професійне навчання, наука та економіка [1].

І це не є ноу-хау, адже інтелектуальні методи стали фундаментом четвертої промислової революції (Industry 4.0), в якій нині розвиваються провідні економіки світу. Основа причина такого поступу, це те, що традиційні алгоритми та людський ресурс більше не можуть впоратись з тими обсягами даних і швидкістю процесів, які існують сьогодні. Тому, сучасна промисловість та енергетика, зокрема в післявоєнний період відбудови України, вимагає високої точності обліку дороговартісних та дефіцитних енергоресурсів, що зумовлює широке впровадження інтелектуальних систем вимірювання витрати.

Серед розмаїття засобів вимірювання витрати та кількості плинних енергоносіїв, особливе місце посідають ультразвукові витратоміри (УЗВ) завдяки їхнім перевагам (неінвазивність, відсутності рухомих частин занурених у потік, широкий діапазон вимірювання тощо [2, 3]). Однак, метрологічні характеристики УЗВ суттєво залежать від профілю швидкості потоку, який деформується під впливом різного роду запірної чи регульовальної арматури та місцевих опорів (МО) вимірювального трубопроводу (ВТ) – коліна, переходи, трійники тощо [4]. За відсутності

спеціальних пристроїв підготовки потоку чи кондиціонерів потоку [4] (які при цьому нівелюють деякі переваги застосування УЗВ, як от неінвазивність), традиційним методом корекції додаткової похибки вимірювання витрати $\delta_{д_ССП}$ зумовленої спотворенням структури потоку (СПП) є встановлення достатньої довжини прямолінійних ділянок ВТ між джерелом спотворення та УЗВ. Та не завжди такі умови створені, адже на промислових майданчиках (не на спеціалізованих вузлах вимірювання, де це норма) місце встановлення витратоміра обирають із врахуванням в першу чергу технологічної доцільності та зручності. В таких випадках використання методів машинного навчання (ММН) для обробки вимірюваного значення витрати, з інтелектуальним коригуванням впливу спотворення структури потоку, стає одним із вирішень описаної проблеми. Проте, ефективність ММН критично залежить від якості та повноти їх навчальних даних (НД) [5], що представляють різні гідродинамічні ситуації (реальні умови роботи витратоміра). В цій роботі поставлено за мету проаналізувати способи створення (формування) та оцінювання НД ММН для ефективного підвищення точності автоматизованих систем вимірювання витрати.

Виклад основного матеріалу досліджень

В статті [6] на базі аналізу великої кількості наукових праць, нами було створено класифікацію сфер застосування ММН для вирішення задач вимірювання витрати та кількості плинних енергоносіїв. Виявилось, що сфера прогнозування витрати або профілю швидкості зі ССП є найбільш оглянутою протягом останніх 25 років. Це і не дивно, адже вплив похибки $\delta_{д_ССП}$, як було вже сказано, є однією із найвагоміших. Задля її усунення, виробники удосконалюють не тільки умови інсталяції (описано вище), а і саму конструкцію УЗВ (до прикладу, збільшують кількість акустичних каналів) чи підходи до алгоритмів обрахунку витрати (до прикладу, застосовують змінні вагові коефіцієнти акустичних каналів). Оскільки основний стандарт по ультразвуковій витратометрії ISO 17089-1 [7] не конкретизує як саме отримати такі вагові коефіцієнти, які, на нашу думку, мали б враховувати ССП, наші подальші дослідження направлені на вирішення цього завдання із застосуванням ММН, зокрема штучних нейронних мереж (ШНМ) [6]. Це в свою чергу потребує надання відповіді на методологічне питання – *звідки брати НД* [8].

Перед тим, як розглянути способи створення (формування) НД, коротко опишемо які ж саме НД нас цікавлять. До прикладу, при застосуванні ШНМ для методу змінного перепаду тисків (МЗПТ), вхідними НД найчастіше виступають корінь квадратний з перепаду тиску на звужуючому пристрої (до прикладу, на діафрагмі), відносний діаметр та інші параметри потоку (кінематична в'язкість, густина тощо). Вихідними (цільовими) НД при цьому виступає витрата [4, 9]. Для УЗВ вхідними НД є масив значень швидкості потоку вздовж кожного хордового акустичного каналу (АК), а вихідними – витрата [10]. Як для першого так і для другого типів витратомірів до вхідних параметрів можна додати тиск та температуру потоку, особливо це важливо для МЗПТ.

В цій роботі основна увага приділена все ж УЗВ. Згідно розробленої нами методології застосування ШНМ для вирішення задач в ультразвуковій витратометрії [8], навчальні дані можна отримати як мінімум трьома *способами*. Кожен із цих способів передбачає те, що повнота (кількість) і якість НД буде різна. Розглянемо ці способи детальніше.

1. Експеримент. Цей спосіб підходить для будь-якого із двох зазначених типів витратомірів. Проведення експерименту в реальних умовах експлуатації або на спеціальній лабораторній установці дозволяє отримати НД в будь якій точці встановлення витратоміра на ВТ та за будь яких його робочих умов (діапазон витрати, геометрія ВТ, термодинамічні характеристики потоку).

До недоліків цього способу можна віднести затрати по фінансах та часу отримання НД, людські та інструментальні (збій вимірювального обладнання) помилки, складність отримання вихідних (цільових) НД, тобто значень витрати. Цільова витрата потоку має бути еталонною, не тою, яку фіксує робочий (досліджуваний) витратомір в умовах ССП. Для вирішення цієї проблеми існує два шляхи: а) застосування еталонного витратоміра, який в реальних промислових умовах експлуатації не застосовують, а отже, робочий витратомір треба перемонтувати на спеціальну сертифіковану лабораторну установку [7]; б) детальне профілювання поля швидкостей (у випадку УЗВ) за допомогою спеціальних методів з мінімальним порушенням потоку – Doppler Global Velocimetry, Particle Image Velocimetry (PIV) або Laser Doppler Anemometry [11]; при використанні

будь-якого з цих методів повнота результатів буде обмежена просторовою роздільною здатністю вимірювальної матриці та часовою стабільністю потоку під час вимірювань, тим не менш, дані, отримані цими методами, забезпечуватимуть найбільш точне представлення витрати через швидкість потоку без застосування еталонного витратоміра.

2. CFD-моделювання. Обчислювальна гідродинаміка (CFD-моделювання) є економічною альтернативою експериментальному способу отримання НД, оскільки вона здатна забезпечити достатній рівень повноти результатів [12 – 14]. Завдяки постійному здешевленню та прискоренню обчислювальних потужностей, а також поширенню різноманітних готових комерційних продуктів, моделювання складних інсталяцій витратомірів нині є загальноприйнятою практикою. Враховуючи це, та всі недоліки експерименту, цей спосіб є найбільш оптимальним для вирішення нашого завдання. Програмними САД-засобами відтворюють будь які геометричні варіації ВТ (чи МО) та місце встановлення витратоміра. Цей спосіб підходить як для МЗПТ так і УЗВ. Програмний CFD-модуль дозволяє моделювати будь які параметри потоку – тип середовища, діапазон витрат, тисків, температури тощо. Знаючи кількість АК та координати їх просторового розташування, чи діафрагми, опісля можна отримати вздовж них значення швидкості потоку або тиск у камерах. При цьому, значення витрати можна отримати кількома способами: а) як значення витрати, задане як гранична умова на кришці ВТ (після витратоміра); б) через суму значень витрати у всіх точках перерізі ВТ на достатній відстані після витратоміра; в) через швидкість або перепад тиску на витратомірі який інстальовано паралельно із досліджуваним витратоміром на байпасній лінії без МО як джерела спотворення.

Поряд із перевагами, цей спосіб отримання також має і недоліки: числовий метод розв'язку рівняння Нав'є-Стокса, що є основою обчислювальної гідродинаміки, може відрізнятись від програми до програми; особливості моделювання фізики ССП, що виражено в застосованій моделі турбулентності, також може відрізнятись від програми до програми; розмір розрахункової сітки та її здатність до подрібнення в особливо складних ділянках (згини, до прикладу). Все це негативно впливає на результати CFD-моделювання, що вимагає обов'язкової експериментальної перевірки (валідація) якості отриманих даних [12 – 14].

3. Суперпозиція аналітичних профілів. Цей спосіб передбачає використання аналітичних квазіреалістичних профілів швидкості потоку отриманих шляхом суперпозиції (накладання) різних простих аналітичних функцій [15 – 17]. Використання цього способу, дозволяє сформувати велику кількість штучних профілів потоку, додаючи аналітичні функції, що нагадують різні ССП. Цей підхід є простим та економічним способом побудови профілів зі ССП після типових МО.

В праці Т. Т. Yeh та Р. І. Espina [15] суперпозиція профілів передбачає те, що повне поле швидкості потоку в середині ВТ складається з трьох компонентів – осьової u та поперечних (v та w). Зазвичай останні не є симетричними відносно осі потоку. Деталізуючи цей факт, можна сказати наступне, в реальних умовах плинне середовище, що рухається в середині ВТ, володіє вектором швидкості, який в кожній точці має три проєкції: u – основний потік «вперед» (саме його необхідно фіксувати витратоміром), v та w – поперечні потоки, рух середовища вліво-вправо або вгору-вниз у поперечному перерізі ВТ. Якщо v та w не дорівнюють нулю, це означає, що в середині ВТ є вторинні течії або закручування (середовище рухається по спіралі, а не по прямій). Згідно [15] осьову компоненту швидкості потоку можна виразити через формулу:

$$u(x, y) = u(r, \theta) = f_r(r)f_\theta(\theta), \quad (1)$$

де $u(r, \theta)$ – осьова швидкість задана в полярних координатах; $f_r(r)$ – симетрична відносно осі потоку функція; $f_\theta(\theta)$ – кутова функція. В [15] більш детально наведено приклади цих функцій.

Компоненти v та w також можна записати через власні функції. До прикладу, типові поперечні або закручені потоки можна описати із застосуванням класичної моделі вихору Тейлора [15, 18]:

$$v = v_0 r_v e^{-r_v^2}, \quad (2)$$

де $r_v = d_c/d_0$, а d_c – відстань від центру вихору; v_0 та d_0 – це константи вихору для інтенсивності та розміру ядра відповідно. Цей розподіл не демонструє прямої залежності варіації швидкості, яка була б обернено пропорційною радіусу d_c . Замість цього він робить більший акцент на обертанні за типом твердого тіла поблизу осі обертання та на експоненціальному загасанні в міру віддалення

від центру – ці характеристики ближче відповідають особливостям вихорів у трубних потоках [19].

На основі цих простих аналітичних профілів швидкості можна сформувати багато складних полів потоку. В [15] наведено деякі повні поля швидкості потоку, отримані за принципом суперпозиції.

Суперпозиція профілів може передбачати активне застосування *степеневого закону розподілу* для опису повністю стабілізованого спотвореного потоку в середині ВТ [11, 16]. Це можна продемонструвати через таку формулу (3) [11]:

$$u(r, \theta, z) = u_c \left[(1 - r)^{\frac{1}{k}} + \sum_{i=1}^n \text{flow disturbance}_i \right], \quad (3)$$

де u – це осьова складова швидкості (у напрямку потоку), u_c – осьова швидкість на лінії центру труби; r, θ, z – відповідно радіальна, азимутальна та осьова координати. Перший доданок у правій частині формули (3) представляє профіль повністю стабілізованого потоку без ССП (степеневий закон розподілу), тоді як другий доданок – суперпозиція спотворень потоку (flowdisturbance). Подібні функції можуть бути створені для радіальної та азимутальної компонентів вектору швидкості, які, наприклад, можуть бути використані для введення осьової завихреності [11].

Використовуючи експериментальні дані та степеневий закон розподілу як основу для суперпозиції профілів, L. A. Salami створив функції в полярних координатах, які описують 23 випадки ССП [16]. В науковій літературі ці функції називають *функціями Саламі*, і їх поділено на три математичні типи за формою запису [16, 17]:

$$u = (1 - r)^{1/n} + mr(1 - r)^{1/k}f(\theta), \quad (4a)$$

$$u = 1 + zrsin(\theta), \text{ при } r \leq b, 0 \leq b \leq 1, \quad (4b)$$

$$u = (1 - zbsin(\theta)) \left(\frac{1-r}{1-b} \right)^{1/n} + m \frac{(r-b)(1-r)^{1/k}}{(1-b)^{1/k}} \text{ при } r \geq b, \quad (5)$$

$$u = \sin\left(\frac{\pi}{2}(1 - r)^{1/n}\right) + msin(\pi(1 - r)^{1/k})f(\theta), \quad (6)$$

де $f(\theta)$ – деяка визначена функція від θ ; b, n, k, m та z – константи на певному профілі [16, 17].

Отже, суперпозиція аналітичних профілів має ряд позитивних моментів:

1. Можливість отримати швидкість потоку в кожній точці перерізу, а отже, вздовж будь-якої траєкторій руху звукових коливань УЗВ. Маючи чітке розуміння координат розташування точок у перерізі, можна отримати усередині значення швидкості застосовувавши числові методи інтегрування (ЧМІ). При цьому, саме ЧМІ впливають на якість даних, адже самі методи (за своєю природою) та механізми їх застосування (до прикладу, функції в MATLAB) мають різну точність.

2. Немає потреби розділяти НД на «з робочого» та на «з еталонного» витратоміра. Для отримання еталонної витрати спотвореного потоку достатньо інтегрувати профіль по всій площі поперечного перерізу ВТ і помножити її на площу перерізу.

3. Як вже було сказано раніше, використання суперпозиції аналітичних профілів дозволяє створювати будь-які типи ССП підбором відповідних констант компонентів у формулі повного поля швидкості потоку в середині ВТ [16, 17].

Попри позитивні сторони, даний спосіб володіє такими недоліками:

1. Підходить тільки при отриманні НД для тих витратомірів, які працюють за швидкісним принципом, як от багатоканальні хордові УЗВ.

2. В класичному записі такі профілі описують структуру потоку тільки в одиничному перерізі ВТ. В реальних умовах, профіль швидкості може змінюватися (як правило, вирівнюватися по шляху руху потоку, стаючи менш спотвореним). Тому, це варто враховувати, приймаючи той факт, що по довжині вимірювальної бази витратоміра в певній фіксованій позиції (на відстані ND до МО) структура спотвореного профілю не змінюється. Це означає, що Декартові координати точок в поперечному перерізі ВТ записують як $(x, y, z = 0)$, де z – координата по якій рухається потік вздовж вимірювальної бази витратоміра. Попри це, існують доповнення до функцій Саламі, які дозволяють описувати зміну структури потоку по мірі руху середовища по ВТ – через введення коефіцієнта експоненціального згасання, що залежить від шорсткості труби та числа Рейнольдса

[20].

3. Чи для профілів Т. Т. Уей та Р. І. Espina чи для всіх 23 функцій Саламі, немає чіткої відповіді який саме тип МО він репрезентує. Єдине, що зробили науковці, працюючи з функціями Саламі, це поділили їх на три групи [17] – одно-, дво- та багатоядерні профілі. Одноядерні профілі (Onepeak) найбільш розповсюджений тип, що описує потік, де його максимальна швидкість знаходиться в центрі з певним незначним зміщенням до однієї стінки (асиметричний потік). До них, згідно праць Саламі, входять такі функції P06, P17, P08, P12, P13 та P09 [16, 17]. Вони подібні до збурень потоку, що формують МО «одиночне коліно». Двоядерні профілі (Twopeaks) через дію відцентрової сили та завихрень розділяються на дві (або симетричні або не дуже) зони з локальними максимумами – «острівцями» високої швидкості біля стінок труби. До них, згідно праць Саламі, входять такі функції P07, P10, P05 та P16 [16, 17]. Джерелом таких збурень найчастіше виступають МО «два коліна в одній площині». Багатоядерні профілі (Morecomplex), в яких поперечний переріз виглядає як мозаїка з декількох зон прискорення та гальмування, і де часто присутнє сильне закручування потоку. До них, згідно праць Саламі, входять такі функції P02, P22 та P20 [16, 17]. Джерелом таких спотворень можуть слугувати комбінації МО «два коліна в різних площинах» (S-подібні або U-подібні вигини), частково відкрита засувки та інша запірна арматура.

4. Застосування цього способу більше підходить для оптимізаційних ММН в задачах удосконалення конструкції витратомірів (координат встановлення АК УЗВ, до прикладу). Для передбачення витрати (з використанням ШНМ, до прикладу) він менш гнучкий, адже значення витрати в конкретному перерізі є незмінним (це не підходить для цільового вектору ШНМ при передбаченні). Єдиний варіант, це створення свої власні профілів (на прикладі розглянутого степеневого закону розподілу) зі зміною степеня як функції числа Рейнольдса (тобто, витрати).

Оцінювання навчальних даних

В другому та третьому способах дослідник має справу з НД, що можуть характеризувати всю повноту профілю швидкості потоку. Це в свою чергу породжує додаткове методологічне питання – як оцінити те, наскільки отримані профілі швидкості є репрезентативними з точки зору складності структури потоку та ступеня його спотворення. Очевидно, що різні конфігурації ВТ (кількість та тип МО) та умови встановлення витратоміра (відстань МО до і після нього) можуть формувати як відносно близькі до симетричних, так і суттєво асиметричні профілі швидкості, які по-різному впливають на похибку вимірювання витрати. Тобто, НД повинні бути для дослідника не тільки в достатній кількості, але й репрезентувати йому найбільш несприятливі, з точки зору похибки, ССП. В такій ситуації існує два шляхи.

Перший, **практичний**, коли існує реальна конструкція ВТ, реальний витратомір і реальна потреба у застосуванні ММН. В такому випадку немає сенсу попередньо оцінювати НД, хіба що для відсіювання «бракованих даних» методами статистичної теорії ймовірностей. Дослідник отримує НД або експериментальним способом або CFD-моделюванням і на базі них працює з обраним ММН. До цього шляху ми рекомендуємо відносити і результати експериментальних досліджень впливу ССП на похибку витратомірів, зібраних у відповідних довідниках чи технічних звітах [21, 4].

Другий, **теоретичний**, коли існує потреба розробити математичну модель передбачення витрати спотворених потоків на базі ШНМ під конкретний витратомір та тип МО, і саме тут потрібне попереднє оцінювання. Суть якого – підібрати тип МО або відстань до нього, що створюватимуть для витратоміра ССП із найбільшим впливом. До речі, від такої попередньої оцінки може залежати те, який саме ММН обрати. Якщо залежність між виходом і входом витратоміра доволі лінійна, навіть для умов ССП, то тут краще застосувати *лінійну регресію*. Якщо залежність нелінійна – застосування ШНМ рекомендовано [6].

Провівши огляд наукових праць за темою роботи, нами було відібрано наступні критерії попереднього оцінювання НД.

Гідродинамічний коефіцієнт – це класичний безрозмірний критерій, що є відношенням фактичної усередненої по всьому перерізу ВТ швидкості потоку u_{act} (або витрати q_{act}) до вимірної швидкості витратоміра u_{meas} (або витрати q_{meas}) [17]:

$$H = \frac{u_{act}}{u_{meas}} \text{ або } H = \frac{q_{act}}{q_{meas}}. \quad (7)$$

Згідно [17], цей параметр можна використовувати як для оцінки ефективності різних конфігурацій та орієнтацій УЗВ на неспотвореному потоці, так і для дослідження впливу різного роду ССП на конкретний витратомір. Чим менше значення коефіцієнта H відхиляється від одиниці (в додатну або від'ємну сторону), тим меншим стає вплив відповідного ССП на точність витратоміра, і навпаки.

Відносна похибка вимірювання витрати – подібний до попереднього критерій, який у відсотковому вимірі вказує на величину впливу ССП на точність витратоміра [7]:

$$\delta = \frac{100(u_{meas} - u_{act})}{u_{act}}. \quad (8)$$

Чим меншим є значення похибки δ (тотожна $\delta_{д_СП}$), тим меншим стає вплив відповідного спотворення на точність витратоміра, і навпаки.

Коефіцієнт чутливості до варіацій – це міра діапазону коефіцієнта H , визначена певною варіацією [17]:

$$S = H_{max} - H_{min}. \quad (9)$$

Це може бути варіація характеристик витратоміра (до прикладу, координат розташування АК УЗВ) до конкретного профілю швидкості потоку (функції Саламі), або варіація функцій Саламі до конкретної характеристики витратоміра (кількість АК). Перший випадок можна віднести до задачі оптимізації, де створені НД використовуються ММН для пошуку мінімуму, а в іншому, до задачі прогнозування витрати (до прикладу, із застосуванням ШНМ). Чим меншим є значення коефіцієнта S , тим меншим є вплив варіації на H в досліджуваному діапазоні.

Розглянемо приклад розрахунку відібраних нами критеріїв оцінювання НД. Для цього обрано 13 таких функцій Саламі P02, P05, P06, P07, P08, P09, P10, P12, P13, P16, P17, P20 та P22. В якості досліджуваного витратоміра обрано чотириканальний хордовий УЗВ зі значеннями координат розташування АК та ваг згідно ЧМІ Гауса-Якобі (рис. 1) [20].

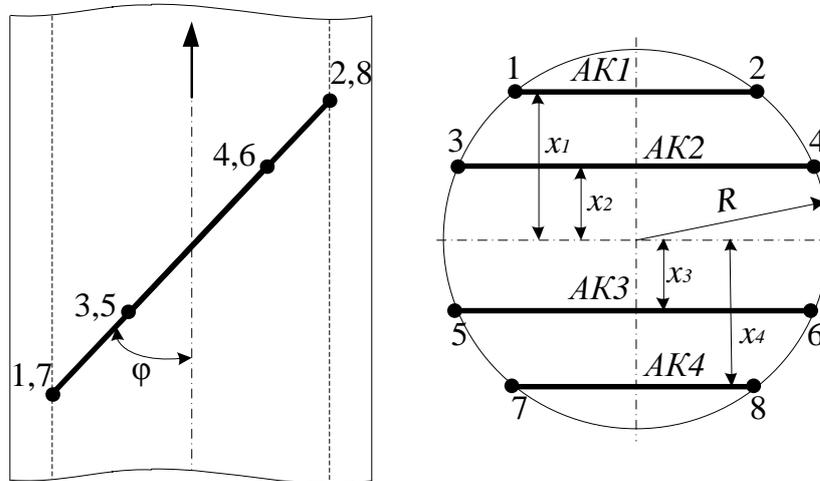


Рис. 1. Схема просторового розташування чотирьох хордових АК УЗВ відносно горизонтальної площини:
 $x_1 = x_4 = \pm 0,809017 \cdot R$ ($w_1 = w_4 = 0,369317$), $x_2 = x_3 = \pm 0,309017 \cdot R$ ($w_2 = w_3 = 0,597566$)

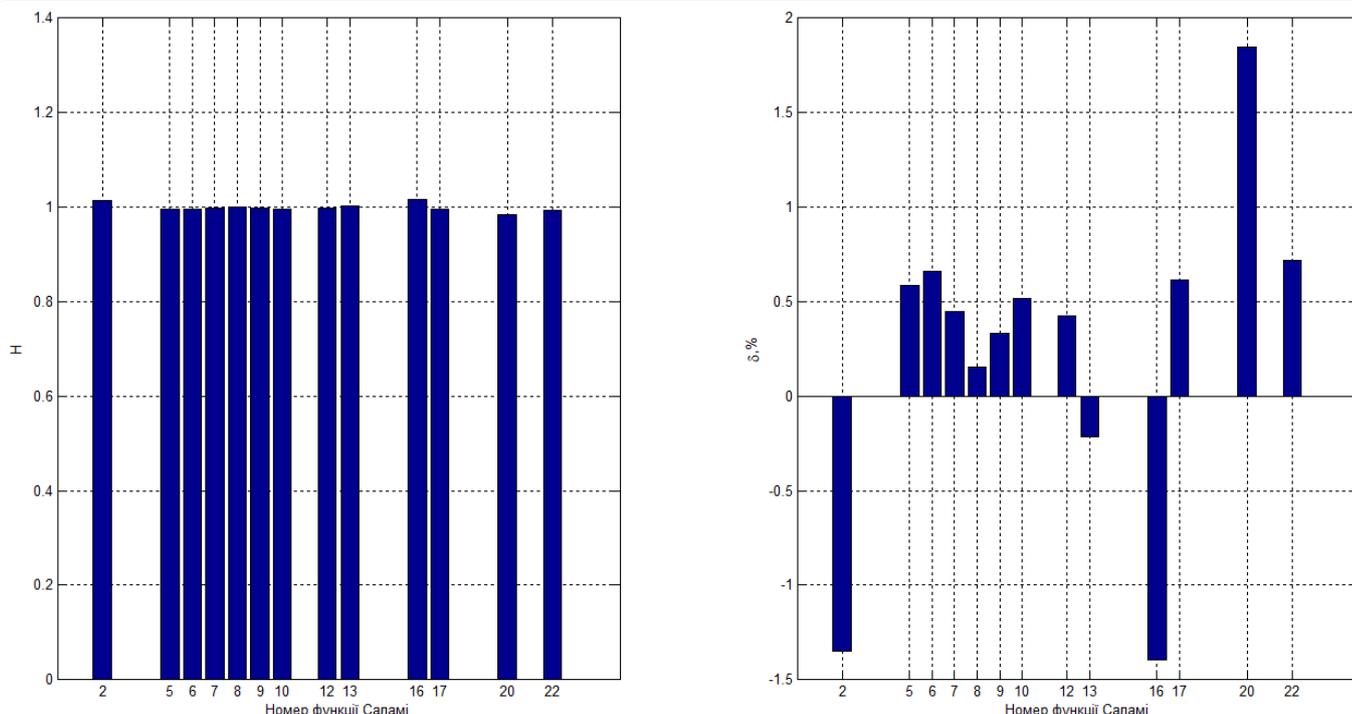


Рис. 2. Результати оцінювання навчальних даних отриманих на базі 13 функцій Саламі із застосуванням гідродинамічного коефіцієнта H та похибки δ

Аналізуючи результати розрахунків коефіцієнта H та похибки δ , що наведені на рис. 2, можна зробити наступні проміжні висновки: а) функції Саламі є адекватним способом створення НД для ММН, адже вони демонструють варіативність впливу на покази УЗВ – коефіцієнт H для одного профілю є більшим 1, а для іншого меншим, похибка δ для одних профілів є додатною, а для інших від'ємною; обираючи функцію Саламі, дослідник обирає, до прикладу, для яких умов проводити оптимізацію конструкції УЗВ; б) тільки дві функції Саламі (P08 та P13) не відповідають стандарту ISO17089-1 щодо умов ССП ($\delta_{д. ССП} \leq \pm 0,3 \%$); решта функцій відповідають, а отже, можуть бути використані як НД для пошуку оптимальної архітектури ШНМ в задачах передбачення витрати зі ССП; в) функції Саламі P20, P16 та P02 створюють найбільш складні набори НД; оскільки ми знаємо до якої групи ці профілі відносяться, було підтверджено експериментальні дані [21], що двоядерні та багатоядерні ССП (після комбінації МО), несуть більший вплив на покази чотириканальних УЗВ аніж асиметричні спотворення (одноядерні функції Саламі).

Оскільки варіацій функцій Саламі за типового розташування досліджуваного УЗВ є обмежена кількість, що не відповідає реальності, було використано коефіцієнт чутливості до орієнтації S . Аналізуючи результати розрахунків коефіцієнта S , що наведені на рис. 3, можна зробити висновок, що орієнтація функції відносно просторового розташування АК УЗВ (чи навпаки) є ще одним параметром під час оптимізації, яку можуть дати НД отримані цим способом. Маючи найбільший вплив на похибку (рис. 2), функції P02 та P20, а також P22, мають найбільший діапазон зміни цієї похибки в залежності від орієнтації. Це говорить про те, що маючи надскладний профіль структури потоку (складні умови експлуатації), існує можливість змінити покази УЗВ знайшовши оптимальні кути встановлення відносно МО або змінивши вагові коефіцієнти АК. Обидві задачі зручно виконувати ММН на базі таких НД. Водночас, для досліджуваного УЗВ, тип спотворення P09 є таким, який найменше піддається усуненню через зміну кута розташування АК. Цей тип спотворення описує потік після МО «90° коліно в горизонтальній площині».

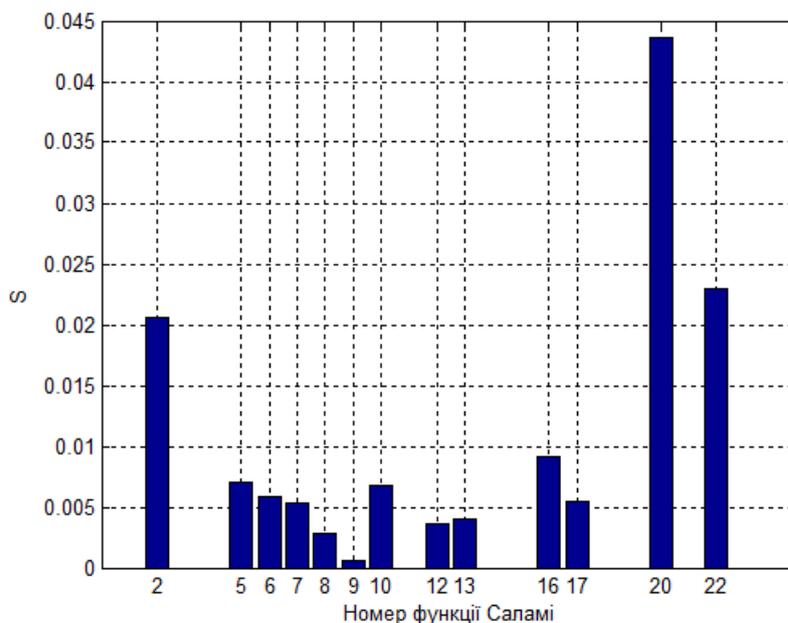


Рис. 3. Результати оцінювання навчальних даних отриманих на базі 13 функцій Саламі із застосуванням коефіцієнта S в діапазоні обертання функції відносно УЗВ від 0 до 180°

Розглянуті до цього критерії оцінювання НД підходять для тих випадків, коли вони створені із застосуванням CFD-моделювання або суперпозиції аналітичних профілів. У випадку тільки експериментальних даних, НД можуть бути обмеженими, тобто тими, які отримуємо із самого витратоміра. Попри це, їх оцінка теж важлива, а отже, в цьому випадку можна застосувати інші критерії.

Коефіцієнт профілю – це фундаментальний показник динамічної ефективності УЗВ для кількісної оцінки асиметрії профілю, що визначається як відношення суми внутрішніх хордових швидкостей до суми зовнішніх хордових швидкостей (рис. 1) [22]:

$$k_p = \frac{u_{AK2} + u_{AK3}}{u_{AK1} + u_{AK4}} \quad (10)$$

Якщо площини, в яких лежать хорди, є паралельними горизонтальній площині (верхні та нижні хорди, як на рис. 1), то такий коефіцієнт оцінює *вертикальну асиметрію профілю*. І навпаки, якщо площини, в яких лежать хорди, є перпендикулярними горизонтальній площині (ліві та праві хорди), то такий коефіцієнт оцінює *горизонтальну асиметрію профілю*.

Критерій симетрії – це співвідношення між потоком у верхній та нижній половині ВТ [22]:

$$k_s = \frac{u_{AK1} + u_{AK2}}{u_{AK3} + u_{AK4}} \quad (11)$$

Критерій поперечності – це порівняння хордових швидкостей, що перетинають потік справа наліво, із тими, що перетинають його зліва направо [22]:

$$k_c = \frac{u_{AK1} + u_{AK3}}{u_{AK2} + u_{AK4}} \quad (12)$$

В ідеальних умовах (неспотворений потік) та конкретній фіксованій конфігурації АК УЗВ, коефіцієнт $k_p = \text{const}$, $k_s = k_c = 1$ [22]. Якщо ці критерії за результатами оцінювання НД відхиляються, це свідчатиме про появу асиметрії потоку.

В якості демонстрації, було обрано дві функції Саламі для порівняння. Перша, функція P20, яка генерує ССП із найбільшим впливом на покази досліджуваного УЗВ як серед відібраних функцій (рис. 2), так і в діапазоні орієнтації (рис. 3). Друга, функція P09, яка є повною протилежністю першій по впливу – одна із найменших похибок (рис. 1) і найменший вплив в діапазоні орієнтації (рис. 3). Вигляд тривимірних профілів цих функцій показано на рис. 4.

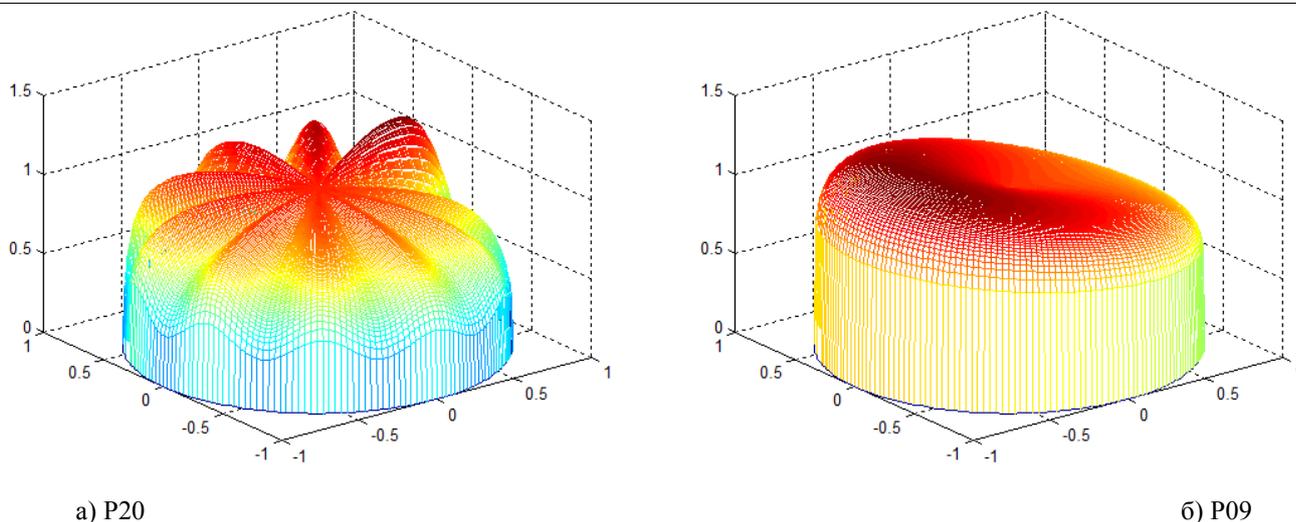
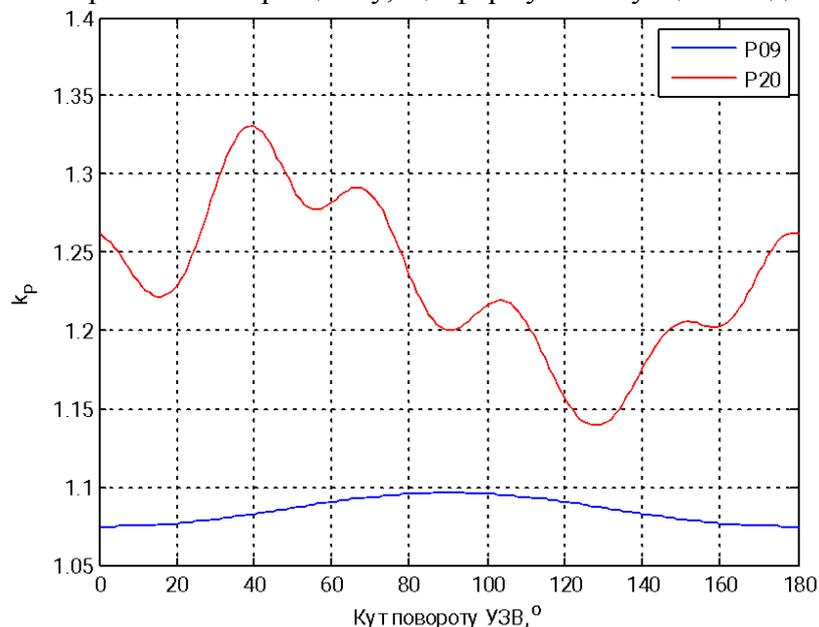


Рис. 4. Тривимірні профілі швидкості спотвореного потоку за функціями Саламі

Як видно з рис. 4, профіль швидкості P09 репрезентує плавне ССП з одним зміщеним максимумом (типова ситуація для МО з одиничним коліном). В той же час, профіль швидкості P20, репрезентує екстремальне ССП з множинними піками (багатоядерність) та провалами швидкості. Такі типи ССП, на нашу думку, можуть бути притаманні потокам, що пройшли крізь частково закриту засувку, сітку або інший елемент, який розділяє суцільний потік на окремі струмені: а) поєднання двох і більше колін у різних площинах, розташованих на короткій відстані одне від одного; б) коли УЗВ встановлено занадто близько до нагнітального патрубку відцентрового насоса (профіль швидкості відтворює виражену лопатеву пульсацію та нерівномірність); в) перехід потоку з малого діаметра у великий без належного формування стійкої зони відриву та вторинні течії при цьому, що формують «зубці» швидкості.

Рис. 5. Залежність коефіцієнта профілю k_p відносно кута повороту УЗВ відносно профілю

Аналізуючи результати оцінювання НД, що зображені на рис. 5, можна побачити радикальну різницю: а) для P09 (синя лінія), коефіцієнт профілю k_p майже не змінюється при повороті УЗВ (1,07...1,1), що свідчить про стабільність (плавність) епюри швидкостей; згідно цього висновку, навіть за наявності асиметрії, співвідношення швидкостей на внутрішніх та зовнішніх АК залишається сталим (покази УЗВ будуть приблизно однаковими незалежно від орієнтації АК), що дозволяє мінімізувати похибку вимірювання витрати УЗВ шляхом введення фіксованого поправочного коефіцієнта; б) для P20 (червона лінія), спостерігаються різкі осциляції чи амплітудні модуляції k_p (1,14...1,33), що є обумовлено дискретним характером «піків» швидкості,

які почергово потрапляють у зону дії різних АК при обертанні УЗВ; це буде призводити до того, що похибка вимірювання витрати УЗВ буде «скакати» залежно від того, чи потрапили внутрішні хорди на пік швидкості «зубців».

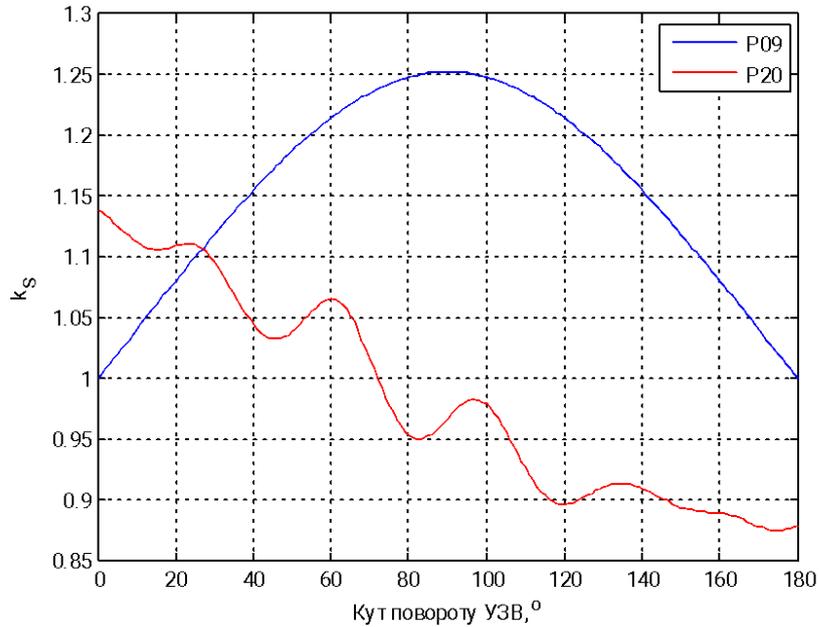


Рис. 6. Залежність коефіцієнта симетрії k_s відносно кута повороту УЗВ відносно профілю

Аналізуючи результати оцінювання НД на рис. 6 (симетрію), можна сказати те, що для функції P09 ми бачимо класичну синусоїду (виражений гармонічний характер) з піком на 90° ($k_s \approx 1,25$), що свідчить про те, що існує чітка вертикальна асиметрію потоку (зміщення ядра потоку в площині, перпендикулярній до АК). Для функції P20 графік хаотичний із загальним трендом до зниження, що вказує на відсутність єдиного ядра потоку, натомість, існує багатофокусна асиметрія, де потік розподілений на кілька локальних зон високої швидкості.

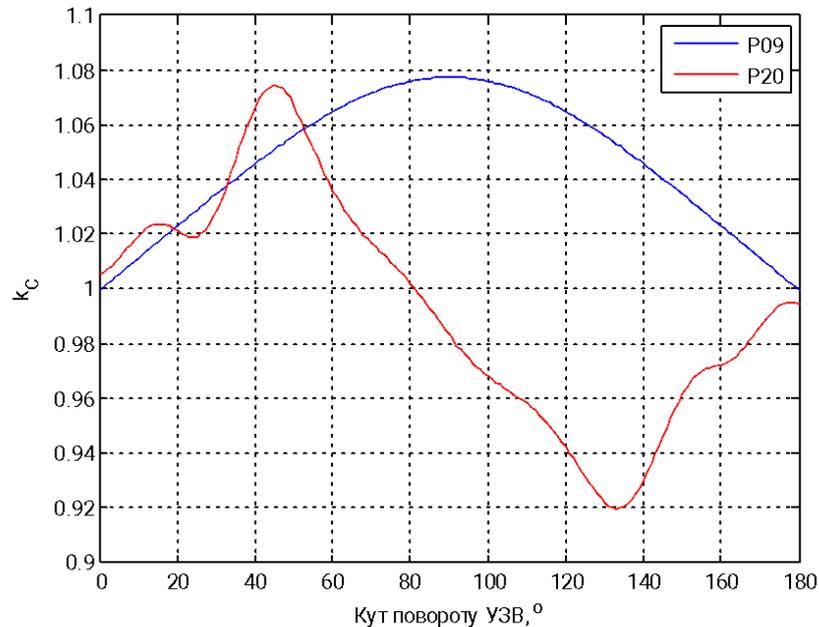


Рис. 7. Залежність коефіцієнта поперечності k_c відносно кута повороту УЗВ відносно профілю

Аналізуючи результати оцінювання НД на рис. 7 (поперечність), можна сказати те, що критерій поперечності для обох типів ССП відхиляється від ідеального значення (що підтверджує наявність перехресних потоків), проте, для функції P20 ці відхилення мають більшу частоту та амплітуду, що засвідчує наявність інтенсивних вихрових структур, що супроводжують «зубчасті» профілі швидкості.

Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами проведених в цій роботі досліджень, можна сформулювати наступні висновки:

1. Існує як мінімум три способи створення НД для ММН: експеримент, CFD-моделювання та суперпозиція аналітичних профілів. Кожен із них володіє своїми перевагами та недоліками:

а) завдяки високому ступеню фізичної достовірності, CFD-моделювання у поєднанні із даними експериментів, є найбільш ефективними способами створення НД для задач реконструкції профілю швидкості потоку та передбачення витрати багатоканальних хордових УЗВ із застосуванням ММН (до прикладу, із застосуванням ШНМ);

б) завдяки повноті відтворення ССП в будь якій точці поперечного перерізу ВТ, CFD-моделювання та суперпозиції аналітичних профілів є найбільш ефективними способами створення НД для задач багатокритеріальної оптимізації конструкції УЗВ із застосуванням ММН (до прикладу, із застосуванням генетичних алгоритмів).

2. Для оцінювання НД з позиції вибору ММН для їх ефективнішого використання, нами відібрано дві групи критеріїв:

а) критерії оцінювання НД отриманих способом CFD-моделювання та суперпозиції аналітичних профілів (гідродинамічний коефіцієнт, відносна похибка вимірювання витрати та коефіцієнт чутливості до варіацій);

б) критерії оцінювання НД отриманих способом CFD-моделювання та експерименту (коефіцієнт профілю, симетрії та поперечності); при цьому, коефіцієнт профілю є найбільш інформативним параметром для ідентифікації типу спотворення.

Запропоновані у статті способи отримання та оцінювання НД для ММН не є вичерпними. Основний посыл роботи в тому, що ґрунтовний підхід до якісного створення та відбору НД для ММН дозволяє вирішувати задачі автоматизованого вимірювання витрати як на етапі проектування, так і забезпечувати стійкість системи вимірювання до гідродинамічних збурень, знижуючи похибку вимірювання в реальних умовах експлуатації.

Темою наших подальших досліджень є застосування розглянутих способів отримання НД ММН та критеріїв їх оцінювання для ефективнішого передбачення витрати потоків зі ССП та оптимізації конструкції багатоканальних хордових УЗВ під конкретні умови роботи витратомірів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text> (дата звернення: 21.02.2026).
2. Lunde P., Froysa K.-E., Vestheim M. GERG Project on ultrasonic gas flowmeters, Phase II : technical monograph TM 11. Brussels : Groupe Europeende Recherches Gazieres (GERG), 2000. 110 p.
3. Measurement of gas by multipath ultrasonic meters : technical report №9 / American Gas Association Transmission Measurement Committee. Washington, 2003. 84 p. URL : <https://teesing.com/media/files/standards/aga-9-2003.pdf>.
4. ДСТУ EN ISO 5167-2:2022 Вимірювання витрати плинного середовища за допомогою пристроїв перепаду тиску, уставлених у заповнених каналах круглого перерізу. Частина 2. Діафрагми (EN ISO 5167-2:2003, IDT; ISO 5167-2:2003, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2022. 28 с.
5. Дранишников Л. В. Інтелектуальні методи в управлінні: навч. посіб. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 416 с.
6. Роман В. І., Бугайчук М. І. Огляд методів машинного навчання для задач автоматизованого вимірювання витрати. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. 4. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-4-27-38>.
7. ДСТУ ISO 17089-1:2021 Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Ультразвукові лічильники газу. Частина 1. Лічильники для комерційного обліку та вимірювання в газорозподільчих системах (ISO 17089-1:2019, IDT). [Чинний від 2022-01-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2021. 320 с.
8. Роман В. І., Бугайчук М. І., Острей Я. С. Методологія застосування штучних нейронних мереж для підвищення точності ультразвукових витратомірів. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. 2. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-2-1-10>.
9. Predicting oil flow rate through orifice plate with robust machine learning algorithms / Abouzar Rajabi Behesht Abad et al. // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2021. Vol. 81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102047>.
10. Luntta E., Halttunen J. Neural network approach to ultrasonic flow measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1999. Vol. 10, Issue 1. P. 35–43. URL: [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(98\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(98)00035-1).
11. Tele-Metrology And Advanced Ultrasonic Flow Metering / P. I. Espina et al. *FLOMEKO 2000. Proceedings of the 10th Conference on Flow Measurement (IMEKO TC9)*, Salvador, Brazil, 4-8 June 2000. URL: <https://www.imeko.info/index.php/tc9-homepage/tc9-events/115-tc9-2000>.
12. Turkowski M., Szufłanski P. New criteria for the experimental validation of CFD simulations. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 34. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.003>.
13. Gibson J. Validation of the CFD method for determining the measurement error in Flare Gas Ultrasonic meter. *Наукові праці ВНТУ*, 2026, № 1

installations. *Proceedings of 27th International North Sea Flow Measurement Workshop*, Tonsberg, Norway, 20-23 October 2009. URL: <https://www.proceedings.com/content/007/007227webtoc.pdf>.

14. In-Service Performance of Ultrasonic Flowmeters Application and Validation of CFD Modelling Methods : technical report №2002/72 / National Measurement System Directorate Department of Trade and Industry. London, 2002. 43 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0802/ML080280326.pdf>.

15. Yeh T. T., Espina P. I. Special ultrasonic flowmeters for in-situ diagnosis of swirl and cross flow. *Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, New Orleans, USA, May 29-June 1 2001. 8 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/237107507_SPECIAL_ULTRASONIC_FLOWMETERS_FOR_IN-SITU_DIAGNOSIS_OF_SWIRL_AND_CROSS_FLOW.

16. Salami L. A. Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes. *Trans. Inst. Meas. Control*. 1984. Vol. 6, Issue 4. P. 197–206. URL: <https://doi.org/10.1177/014233128400600403>.

17. Moore P. L., Brown G. J., Stimpson B. P. Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology. *Measurement Science and Technology*. 2000. Vol. 11, № 12. P. 1802–1811. URL: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/12/321>.

18. Dryden H., Murnaghan F. D., Bateman H. *Hydrodynamics*. New York : Dover Publ. Co., 1956. 213 p.

19. Mattingly G. E., Yeh T. T. NIST's Industry-Government Consortium Research Program on Flow Meter Installation Effects : summary report with emphasis on research period July-December 1987 / National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 1988. 184 p. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.88-3898>.

20. Accuracy analysis of the acoustic discharge measurement using analytical spatial velocity profiles / B. Lüscher et al. *Proceedings of Hydro 2007*, Granada, Spain, 15-17 October 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/290989362_Accuracy_analysis_of_the_acoustic_discharge_measurement_using_analytical_spatial_velocity_profiles.

21. Wilson M. B. Installation effects on multi-path ultrasonic flowmeters : technical report EUR 16175 EN. Research & Engineering Centre BP International Ltd. Sunbury (UK), 1995. 81 p.

22. Zanker K. J. The Transit Time Difference Ultrasonic Gas Meter – A Reassessment. *Proceedings of 21st International North Sea Flow Measurement Workshop 2003*, Tønsberg, Norway, 28-31 October 2003. URL: <https://nfoqm.no/wp-content/uploads/2019/02/2003-10-The-Transit-Time-Difference-Ultrasonic-Gas-Meter-A-Reassessment-Zanker-Daniel-Industries.pdf>.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2026.

Стаття пройшла рецензування 05.03.2026.

Роман Віталій Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: vitalii.i.roman@lpnu.ua.

Бугайчук Максим Іванович – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: maksym.i.buhaichuk@lpnu.ua.

Національний університет «Львівська політехніка».