

Катаєв Д.А.,
orcid.org/0000-0002-2383-3123,

Квашук Д.М., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881,

Думбрава С.М.,
orcid.org/0009-0004-3280-7076

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Національний авіаційний університет

627627@stud.nau.edu.ua,
dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua,
6876695@stud.nau.edu.ua

Вступ

Ідея використання теорії нечітких множин в області вимірювань та обробки даних була запропонована і обговорена у ряді досліджень. Використання цієї теорії в метрології ґрунтується на припущенні, що похибка вимірювання - це ідеалізоване поняття, і її точне значення не може бути відоме. Вимірвальні задачі та обчислення з неточно заданими даними часто супроводжуються нечіткістю, яка виникає з різних причин. Традиційні методи метрології враховують лише добре формалізовану інформацію, тоді як теорія нечітких множин дозволяє врахувати також погано формалізовану інформацію, що може збільшити точність вимірювань. Значною мірою невизначеність знайшла своє відображення в вимірюваннях лінійних розмірів, форм та положень поверхонь, відносних положень елементів, комплексних геометричних форм, а також обертальних моментів, що містить систематичні та випадкові компоненти похибок вимірювання, де вплив дестабілізуючих факторів обумовлений вібраціями, температурним впливом та іншими факторами має вагомий вплив на точність.

Разом з тим, засоби та методи теорії нечітких множин можуть використовуватись для обробки погано формалізованої інформації та уточнення результатів вимірювання в умовах невизначеності. З цього випливає необхідність подолати розбиття між традиційними інструментальними

похибками та достовірністю отриманої вимірвальної інформації, яка може бути визначена з урахуванням критеріїв достовірності, що можна отримати використовуючи засоби нечіткої логіки.

Постановка проблеми

Під час вимірювання механічних величин доводиться враховувати якомога більше джерел похибок з метою компенсації або виключення цих показників з результатів вимірювань. Похибки, які можна компенсувати, або виключити з обрахунків, зазвичай умовно відносять до систематичних, а ті, які врахувати та виключити не вдається – до випадкових похибок [1]. Так, наприклад, температурну похибку можна класифікувати як змінну систематичну похибку, якщо відомий її функціональний зв'язок з температурою. Але якщо температура приладу змінюється настільки швидко, що протягом одного вимірювання відбувається декілька доволі вагомих непередбачуваних коливань, то температурну похибку слід класифікувати як випадкову, спричинену впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів. При проведенні калібрування за допомогою зразкових мір, точність яких вища за точність вимірвального приладу, певну частину систематичних похибок можна розрахувати з високою точністю. Крім того, є можливість із застосуванням методу математичних розрахунків, або автоматично проводити перевірку вимірвального приладу по цій зразковій мірі перед кожним вимірюванням. Але,

такий підхід дуже трудомісткий та вимагає значних витрат часу [2]. Крім того, всі дестабілізуючі фактори та викликані ними похибки завчасно невідомі і випадковим чином змінюються у часі. Тому, можна стверджувати, що ми маємо справу з цілим рядом випадкових функцій часу. Оскільки результуюча похибка вимірювального приладу в будь-який момент часу виявляється випадковою величиною то задача розробки методів її визначення та корекції є актуальною та вимагає подальшого дослідження. Разом з тим, вже існуючі методи оцінювання похибок використовуючи нечітке трактування невизначеності інформації широко використовується в експертних системах та системах нечіткого контролю. Але ці системи не можуть вирішувати задачі статистичної обробки результатів вимірювань, оскільки погано корелюють з теорією ймовірностей. Зазвичай, в метрологічних задачах основну математичну обробку виконують за допомогою статистики, а нечіткі множини використовують для обробки слабо формалізованої інформації та уточнення результатів. Тому існує необхідність інтегрувати традиційні методи метрології в теорію нечітких змінних, представляючи характеристики похибок, як нечіткі змінні з урахуванням специфіки обробки результатів вимірювань та прийнятих метрологічних норм.

Мета

Дослідити способи оцінки достовірності результатів координатних вимірювань та вимірювань обертальних параметрів з використанням теорії нечітких множин.

Аналіз літератури

Дослідження, що проводились в роботі [3] висвітлюють проблему підвищення точності вимірювань сенсорних мереж, де запропоновано метод інтеграції результатів вимірювань сенсорів з урахуванням, як нейро-нечітких, так і ймовірнісних моделей та методів. Це дозволило збільшити точність вимірювань за рахунок прогнозування ряду невизначених даних. Разом з тим, даний метод не є універсальним, оскільки враховує обмежену

кількість параметрів. Дослідження, які проводились в роботі [4] сприяли вивченню властивостей відображення нечітких інтервалів, які описують відношення між точним та неточним вимірюванням. В результаті запропоновано вимірювання механічних величин, що враховує систематичні та випадкові значення, співвідношення яких певною мірою характеризує похибку вимірювання. В роботі [5] досліджено проблему оцінки похибки непрямих вимірювань, одну з основних проблем теорії вимірювань та обґрунтовано чому статистичний підхід не завжди адекватний. Запропоновано нову парадигму: використання нечітких інтервалів, як основи для теорії вимірювання.

Розробка методів і засобів перевірки, а також методів контролю неможлива без попереднього аналізу характеристик та причин виникнення похибок перетворення.

Похибки вимірювальних засобів залежно від характеру їх виникнення, виду спотворення вихідних сигналів і відповідно до методів корекції вихідної інформації можуть бути розділені на дві групи: 1) відмови (збої); 2) похибки. Відмови (збої) перетворювачів відрізняються дискретним характером спотворення результатів перетворення і кінцевим (найчастіше – бінарним) числом станів правильне функціонування – помилка. Різниця між збоями та відмовами визначається тільки тимчасовими характеристиками і зворотністю несправностей: похибки на одному або декількох циклах перетворення (або тактах опитування) належать до збоїв; незворотні похибки називаються відмовами; зворотні похибки великої тривалості – перемежованими (тимчасовими) відмовами.

Похибки вимірювальних засобів відрізняються безперервним характером спотворення результатів перетворення і, таким чином, дають можливість кількісної оцінки похибок вихідної інформації. Наслідки відмов (збоїв) також можуть бути оцінені кількісно, однак, по-перше, ця оцінка можлива лише за межами поля допуску (всередині цього поля існують тільки

похибки), а по-друге, виявлення факту відмови здебільшого обходиться без попереднього кількісного виміру викривлень інформації. Кількісна оцінка цих викривлень може знадобитися тільки для корекції похибок перетвореної інформації, а також під час атестації та перевірки приладів. В такому випадку похибка може бути представлена комплексно, де враховано і відмови та збої, а також окремі випадки де присутня невизначеність, як наприклад за запропоновано в роботі [6], де висвітлено традиційні засоби вимірювання та вимірювання з використанням нечіткої логіки комплексно, використовуючи нечіткі змінні та враховуючи специфіку обробки результатів вимірювань та прийнятих метрологічних норм.

Обидва види похибок пов'язані між собою певними пороговими значеннями: кількісне зростання, або накопичення похибок після їх виходу за поле допуску призводить до виникнення відмов, або збоїв результатів перетворення. Тому, для визначення точності, наприклад окремого діапазону вимірювання функція достовірності вимірювання може бути представлена наступним чином:

$$\mu(W) = \begin{cases} 0 & \text{if } W < W_{\min} \\ \frac{W - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} & \text{if } W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \\ 1 & \text{if } W > W_{\max} \end{cases}, \quad (1)$$

де: $\mu(W)$ – це функція достовірності; W – вимірювальна величина; W_{\min} та W_{\max} – мінімальне та максимальне значення відповідно.

В такому випадку, точність буде виражена коефіцієнтом у проміжку між 0 та 1.

Для вимірювань в окремих режимах роботи відповідний діапазон достовірності може бути використаний для роботи в умовах невизначеності. Наприклад під час вимірювання пускових моментів електродвигунів, або геометричних форм наноповверхонь, де звичайні сенсорні системи в окремих умовах під впливом дестабілізуючих факторів можуть мати обмежену

точність. Таким чином, точність перетворення являє собою ступінь наближення результату перетворення до істинного значення вимірюваної величини і може характеризуватися похибкою, порогом чутливості, динамічним діапазоном і роздільною здатністю з урахуванням певної достовірності вимірювальних результатів.

Похибка перетворення визначається тією, або іншою оцінкою відхилення реальної вихідної характеристики перетворення від істинної (ідеальної, теоретичної) характеристики. Існують два види оцінки похибок: 1) абсолютна похибка $\Delta y(x)$; 2) відносна похибка $\delta y(x)$ – і відповідні їм числові характеристики (максимальні та наведені значення похибок) [7].

Абсолютна похибка $\Delta y(x)$ є алгебраїчною різницею між однойменними точками теоретичної та реальної характеристик перетворення і в загальному випадку є функцією зміни механічної величини:

$$\Delta y(x) = y(x) - y_T(x), \quad (2)$$

де $y_T(x)$ і $y(x)$ – відповідно теоретичні та реальні значення вихідної функції перетворювача.

Відносна похибка $\delta y(x)$ визначається відношенням поточного значення абсолютної похибки $\Delta y(x)$ до поточного значення вихідної функції і також є в загальному випадку функцією зміни механічної величини:

$$\delta y = \frac{\Delta y(x)}{y_T(x)}, \quad (3)$$

або

$$\delta y(x) \approx \frac{\Delta y(x)}{y(x)}. \quad (4)$$

Числові характеристики визначаються максимальними значеннями абсолютної $\Delta_{max} y$ і відносною $\delta_{max} y$ похибок на всьому діапазоні перетворення, а також наведеними значеннями відносною похибки:

$$\delta_{пр} y = \frac{\Delta_{max} y}{D_y}, \quad (5)$$

або

$$\delta_{пр} y = \frac{\Delta y}{D_y}. \quad (6)$$

де D_y – діапазон перетворення; Δy – половина ширини поля допуску (інтервалу невизначеності). Максимальне значення

наведеної похибки визначає клас точності перетворювача.

Усі види похибок вимірювальних приладів можуть визначатися, як стосовно виходу перетворювача (Δy , δy), так і стосовно його входу (Δx , δx), тобто виражатися в масштабі вхідної величини. Перерахунок похибок проводиться з урахуванням швидкості перетворення

$$S(x): \Delta x = \frac{\Delta y(x)}{S(x)}. \quad (7)$$

Похибки перетворення класифікуються за такими критеріями: характер прояву; характер залежності від значень вхідної величини; характер зв'язку з динамічними характеристиками вхідної величини; причини виникнення; тимчасові характеристики; вид інформативного параметра.

За характером прояву похибки діляться на систематичні та випадкові. Систематичні похибки постійні у всьому діапазоні перетворення, або змінюються за певним законом у функції від часу, або від вхідного переміщення.

Випадкові похибки характеризуються відсутністю явних функціональних залежностей від значень перетворюваної величини. За багаторазових перетворень тих самих значень вхідного переміщення ці похибки набувають різних значень.

За характером залежності від значень вхідної величини систематичні похибки діляться на: адитивні; мультиплікативні; нелінійні; комбіновані. Адитивні похибки (похибки «нуля») мають постійне, не залежне від вхідної величини значення у всьому діапазоні зміни вхідного переміщення і призводять до паралельного переміщення вихідної характеристики перетворювача. Прикладами адитивних похибок можуть слугувати: зона нечутливості, похибка люфту, гістерезис; неузгодженість нулів тощо. Мультиплікативні похибки (похибки чутливості) прямо пропорційні значенню вхідного переміщення і визначаються зміною кута нахилу вихідної характеристики (зміною масштабу перетворення).

У кодових перетворювачах послідовного типу можливий окремий випадок мультиплікативної похибки – накопичена

похибка. Нелінійні похибки мають довільний характер зміни в часі або у функції від вхідного переміщення. Окремий випадок нелінійної похибки – циклічна похибка, що викликається різного роду механічними биттям, фазовими спотвореннями тощо; циклічний характер мають систематичні похибки перетворювачів, побудованих на трансформаторних датчиках електромашинного виконання. Комбіновані похибки визначаються сумою адитивної, мультиплікативної та нелінійної похибок.

За характером зв'язку з динамічними характеристиками вхідного переміщення похибки можуть бути: статичними; динамічними. Статична похибка вимірювального приладу відповідає режиму перетворення постійного переміщення, або переміщення, що повільно змінюється у порівнянні з часом перетворення. Динамічна похибка являє собою додаткову складову, обумовлену зміною перетворюваної величини.

Динамічні похибки можуть бути пов'язані з: динамічними характеристиками (інерційністю) датчиків, елементів і вузлів перетворювача; кінцевим часом аналого-цифрового перетворення; інтерполяцією перетворення в проміжку між сусідніми (за часом) відліками. Кінцевий час перетворення позначається не лише на похибках визначення моментів часу, до яких належать результати перетворення, але й на додаткових похибках самого перетворення (наприклад, у перетворювачах безпосереднього зчитування з послідовним опитуванням розрядів). Значення динамічної похибки вимірювального приладу залежить від динамічних властивостей вхідного переміщення і використовуваного методу перетворення [8].

За причинами виникнення похибки прийнято ділити на дві групи: 1) методичні; 2) інструментальні. Методичні похибки обумовлені недоліками обраного методу перетворення (похибки: інтерполяції, лінеаризації характеристик нелінійних датчиків, квантування, апроксимації функціональних залежностей; впливу навантаження, внутрішнього опору джерел

живлення, ірраціональності передавального відношення рейкового зачеплення в перетворювачах лінійних переміщень з куттовими датчиками тощо).

Інструментальні похибки визначаються властивостями елементів, що входять у структуру перетворювача переміщень, і залежно від джерела похибок діляться на основні та додаткові. Основна похибка може мати технологічний, конструктивний або експлуатаційний характер і визначається при номінальних значеннях дестабілізуючих факторів.

Додаткова похибка виникає внаслідок зміни параметрів під впливом зовнішніх або внутрішніх факторів. До внутрішніх належать: несиметричність сигналів живлення, коливання частоти живлення, непостійність навантаження тощо; до зовнішніх – електричні та магнітні поля, температура, вологість, тиск, вібрація тощо. Інструментальні похибки відрізняються великою різноманітністю і залежать не тільки від типу і фізичного принципу побудови вимірювального приладу, але й від його конструктивного виконання. Для резистивних перетворювачів характерні похибки, пов'язані з нерівномірністю кроку намотки й опору провідника по довжині, неточністю геометричної форми каркаса тощо.

Електромагнітним перетворювачам властиві похибки, викликані нерівномірністю повітряних зазорів, неточністю намотування або розподілу секцій, непостійністю кроку зубців, полюсів, обмоток, ексцентриситетом взаємного положення рухомих і нерухомих частин тощо. Похибки оптоелектронних перетворювачів складаються з похибок: виконання заходів (крок прямування, ширина, напрямок), розташування заходів (перекіс, непаралельність площин, нерівномірність зазорів), розташування активних і чутливих елементів тощо.

За часовими характеристиками похибки поділяються на постійні та змінні. Постійні похибки не змінюються протягом часу перетворення або періоду експлуатації перетворювача. Змінні похибки змінюються в часі за певним законом; з безлічі видів змінних похибок можуть бути виділені прогресивні та періодичні похибки[9].

Прогресивні похибки відрізняються монотонним (зростає або убуває) характером зміни; періодичні похибки характеризуються періодом зміни значення і знака.

За видом інформативних параметрів, похибки яких оцінюються, розрізняють амплітудні, фазові, частотні й тимчасові похибки.

Результати класифікації похибок зведені в таблиці.

Таблиця. Класифікація похибок вимірювальних засобів

Класифікаційні ознаки	Вид похибок
Характер прояву	Систематичні, випадкові
Характер залежності від вхідної величини	Адитивні; мультиплікативні (прості, накопичені); нелінійні (довільні, циклічні); комбіновані
Характер зв'язку з динамічними характеристиками вхідної величини	Статичні; динамічні (джерела: інерційність елементів, час перетворення, інтерполяція результатів)
Причини виникнення	Методичні (джерела: інтерполяція, квантування, ірраціональність, апроксимація, вплив навантаження). Інструментальні: основні (технологічні, конструктивні, експлуатаційні); додаткові (джерела: зовнішні, внутрішні фактори)
Часові характеристики	Постійні; змінні: випадкові, прогресивні, періодичні
Вид інформативного параметра	Амплітудні, фазові, частотні, тимчасові, кодові

Згідно зі співвідношеннями (1) і (2), для визначення похибок потрібні теоретичні значення вихідної характеристики перетворення $y_T(x)$. Тим часом значення $y_T(x)$, відповідні поточним значенням переміщення x , не можуть бути відомі, адже навіть при використанні розрахункових значень $y_T(x)$ необхідно знати точні значення x , що пов'язано з додатковими вимірами і похибками, які їх супроводжують.

Крім того, значення похибки має в загальному випадку випадковий характер, і тому навіть при гіпотетичному знанні точних значень $y_T(x)$ однократне визначення похибки по співвідношеннях (1) і (2) може бути недостовірним. Зазначені обставини обумовлюють використання для оцінки похибок, заснованих на обробці результатів багаторазових перетворень. Існують такі види числових оцінок: а) визначення середнього арифметичного з ряду рівноточних перетворень:

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad (8)$$

де n – число перетворень; б) визначення максимального значення похибки Δ_{max} із заданої серії n перетворень: $\Delta_{max} = \max \Delta_i$, $1 \leq i \leq n$; в) визначення середнього квадратичного відхилення σ з використанням для оцінки похибок перетворення подвоєного (2σ) або потроєного (3σ) (залежно від закону розподілу похибок) значення σ :

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_{cp} - \Delta_i)^2}}{(n-1)}. \quad (9)$$

г) визначення довірчої похибки $\pm \Delta_q$, що задає інтервал, в якому дійсне значення $y(x)$ перебуватиме з заданою вірогідністю; д) визначення ентропійного значення похибки Δ_3 , що задане значеннями похибки з рівномірним законом розподілу, якому відповідає ефективний інтервал невизначеності, еквівалентний інтервалу невизначеності, що викликається похибкою з реальним законом розподілу:

$$\Delta_3 = \pm 0,5 \exp H \left(\frac{y}{y'} \right), \quad (10)$$

де $H \left(\frac{y}{y'} \right)$ – значення умовної ентропії (характеризує невизначеність, яка залишається після отримання показника y').

Залежно від закону розподілу похибок Δ_3 набуває значення в діапазоні $\Delta_3 = \left(1,6/2,0 \right) \sigma$. При цьому точність перетворення може бути охарактеризована у такий спосіб:

$$A = \frac{y}{d} = y(2\Delta_3), \quad (11)$$

де d – поточне значення інтервалу невизначеності вихідної характеристики вимірювального приладу [10].

Найбільш повна оцінка похибок вимірювальних приладів може бути отримана з законів їх розподілу в інтегральній або диференційній (щільність розподілу ймовірності) формі. Випадкові похибки вимірювальних засобів (або їх окремих блоків) найчастіше підкоряються рівномірному і нормальному законам розподілу або різним композиціям цих законів (двомодальному, трикутному, трапецеїдальному тощо). У загальному випадку похибки залежать від значень вхідного переміщення x , що може бути охарактеризоване відповідним умовним розподілом похибок, або чисельними значеннями похибок в кожній точці шкали.

Якщо відомі характеристики похибок окремих блоків вимірювального приладу, результуюча похибка може бути в загальному випадку визначена таким чином:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 + 2 \sum_{j=1, j \neq l}^m r_{ji} \sigma_j \sigma_l}, \quad (12)$$

де σ_Σ – коефіцієнт взаємної кореляції похибок σ_j і σ_l ; m – число блоків.

При жорсткій кореляції похибок $r_{ji} = \pm 1$; в цьому випадку похибки складаються алгебраїчно, наприклад, щодо похибки σ_1 :

$$\sigma_x = \sigma_1 + \sum_{j=\sigma}^m r_{1j} \sigma_j$$

За відсутності зв'язку між похибками $r_{ji} = 0$ результуюча похибка має наступний вигляд

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}. \quad (13)$$

тобто, похибки складаються геометрично [11].

Враховуючи потреби у збільшенні вимірювальних даних слід звернути увагу на невизначеність окремих параметрів,

зокрема тих, що мають мультиплікативні характеристики. Так, діапазон достовірності має бути врахований, або функціонально, або табличним способом. Для визначення відповідного діапазону достовірності в роботі [12] представлено вимоги до обробки систематичних і випадкових складових похибок за допомогою теорії нечітких змінних. Зокрема, пропонується розділення систематичної та випадкової складових похибок. Для кожної з них мають застосовуватися відповідні правила роботи з інтервальними характеристиками. Таким чином, застосування теорії нечітких змінних має забезпечувати зменшення середньоквадратичного відхилення, або інтервалу невизначеності випадкової складової похибки при усередненні результатів вимірювань.

Систематична складова похибки повинна оброблятися за правилами інтервальної арифметики. Значення характеристик похибки мають збігатися, або бути близькими до оцінок, отриманих за допомогою традиційних методів вимірювання. Разом з тим, використання лінеаризації у метрологічному аналізі, обмежується розглядом тільки лінійних операцій з нечіткими змінними.

Застосування теорії нечітких множин для визначення діапазону достовірності вимірювань механічних різних механічних величин.

Використовуючи спрощену модель обертального моменту асинхронного

електродвигуна, яка може бути використана для приблизних розрахунків (13), припустимо, що точність вимірювання залежить від вібрації в підшипниках та збільшується пропорційно збільшенню моменту. В такому випадку модифікуємо (13), додавши туди додаткову змінну, яка має експоненціальну залежність від рівня величини вихідного сигналу та змінюється випадковим чином в певному діапазоні (14). Результат моделювання моменту розгону електродвигуна представлено на рис.1.

$$M = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot K_T^2} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{R_2}{S}}{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2K}^2}, \quad (14)$$

де: M – обертальний момент електродвигуна (Нм); m_2 – число фаз обмотки ротора; ω_1 – кутова швидкість, (рад/с); K_T – коефіцієнт трансформації двигуна; U_1 – напруга мережі, (В); R_2 – активний опір обмотки ротора, (Ом); S – показник ковзання підшипників; x_{2K} – реактивний опір, (Ом).

$$M = \left(\frac{m_2}{\omega_1 \cdot K_T^2} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{R_2}{S}}{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{2K}^2} \right) \cdot e^{\lambda \cdot M} \cdot k_{rand}, \quad (15)$$

де λ є коефіцієнтом, що визначає ступінь експоненціальної залежності; k_{rand} – випадкове число в певному діапазоні, яке можна використовувати для моделювання випадкових змін.

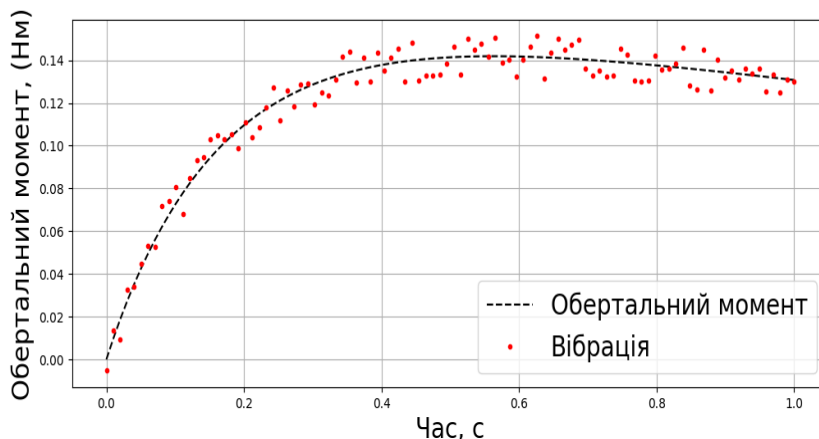


Рис. 1. Моделювання розгону електродвигуна у врахуванням мультиплікативної похибки, що спричинена вібрацією

Із рис.1 бачимо, що функція достовірності у відповідності до (1) буде найбільшою в період початкових значень вимірювальної величини.

Застосувавши теорію нечітких множин для визначення діапазону достовірності, з урахуванням мультиплікативної похибки, використовуючи (1), отримаємо функцію приналежності для даного

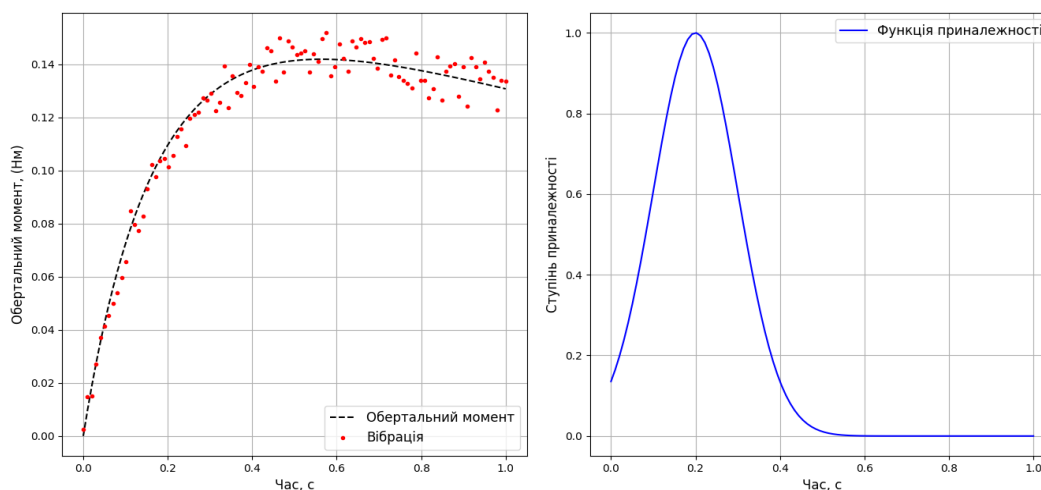


Рис. 2. Функція достовірності результатів вимірювання обертального моменту

Дослідження результатів переміщення координатно-вимірювальної руки (КВР) навколо деталі, збираючи точки даних, які містять похибку також можуть бути проаналізовані на предмет достовірності з використанням теорії нечітких множин.

Наприклад під час серії вимірювань КВР, через вібрації, або температурні впливи існує проблема зменшення точності вимірювання. В залежності від геометричних особливостей деталей можна визначити діапазони достовірності вимірювань використовуючи теорію нечітких множин. Враховуючи, що вимірювані координати точок поверхні моделі будуть містити не тільки похибки виготовлення та складання моделі, а й похибки налаштувань КВР, для оцінки точності моделі мають бути виключені з результати попередніх вимірів.

Так, у відповідності до математичних моделей, які зазначені в роботі [13], було проведено моделювання вимірювання крила повітряного судна (рис.3), де

діапазону вимірювання (рис.2), де бачимо, що найбільш точні показники можна отримати на початку розгону, коли вібрація мінімальна. Звичайно, що дана модель не враховує момент імпульсу, або ривка електродвигуна, що зумовлює внесення змін в алгоритм визначення найбільш точного діапазону відповідних параметрів.

можна спостерігати, що найбільш точними результатами вимірювання є такі, що проходять вздовж крила.

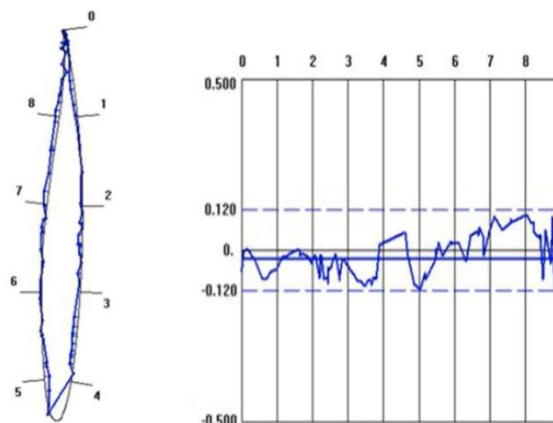


Рис. 3. Модель вимірювання поверхні крила повітряного судна [13]

Змоделювавши вибірку вимірювальних даних, що відповідають заданим критеріям достовірності, застосовуючи формулу (1), можна, застосовуючи модель із [13] та побудувати 9 експериментальних вибірок, які мають відповідний рівень достовірності та визначити точність таких вимірювань (рис.4).

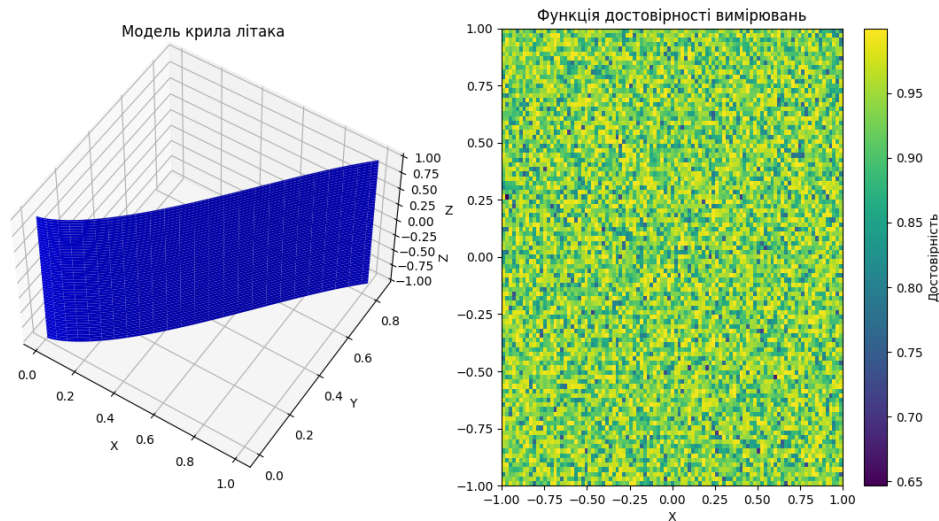


Рис. 4. Функція достовірності вимірювання геометричних параметрів поверхні крила повітряного судна.

Враховуючи відсутність різких перепадів запропонованої геометричної поверхні, достовірність отриманих даних має рівномірне розподілення. Разом з тим, більш повна оцінка точності КВР може бути отримана з законів розподілу похибок в інтегральній, або диференційній формі.

Таким чином, результати моделювання можуть бути використані для покращення точності вимірювань параметрів деталей за допомогою координатно-вимірювальних машин, а також для визначення точності вимірювань обертальних параметрів електродвигунів.

Разом з тим, застосування нечіткої логіки для визначення необхідного рівня достовірності в реальних умовах, враховуючи негативний вплив зовнішніх дестабілізуючих чинників та фактор невизначеності, може допомогти підвищити якість вимірювань.

Висновки

Використання нечітких множин може підвищити достовірність вимірювань механічних величин, хоча це не скоротить похибку. Разом з тим, із застосуванням нечіткої логіки можна вдосконалити інструментарій обробки даних звузивши інтервал невизначеності. Наведені приклади оцінки точності вимірювання різних механічних величин, таких

обертальний момент електродвигуна та геометричні параметри окремих моделей, використовуючи формулу (1) вказують на універсальність методу та алгоритму його реалізації, з використанням програмних бібліотек для візуалізації даних та роботи з масивами даних.

Література

1. Саункін В.Т. Дослідження похибки обробки при використанні засобів активного контролю / В.Т. Саункін, С.Г. Онищук // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ, 2010. – № 4 (15). – С. 85-89.
2. Gåsvik, K.J. Optical metrology. – John Wiley & Sons, 2023. – 392 p.
3. Gonella L. Proposal for a revision of the measure theory and terminology // Alta Frequenza, 1975. – Vol. XLIV. – No. 10.
4. Michał K. Urbański, Janusz Waśowski. Fuzzy measurement theory. Measurement. – Vol. 41. – Iss. 4. – 2008. – P. 391-402.
5. Solopchenko G.N., Reznik L.K., Johnson W.C. Fuzzy intervals as a basis for measurement theory. NAFIPS/IFIS/NASA '94. Proceedings of the First International Joint Conference of The North American Fuzzy Information Processing Society Biannual Conference. The Industrial Fuzzy

Control and Intellige, San Antonio, TX, USA, 1994. – P. 405-406.

6. *Murtha J.* Applications of fuzzy logic in operational meteorology. Scientific Services and Professional Development Newsletter, Canadian Forces Weather Service, 1995. – P. 42-54.

7. *Czichos H., Saito T., Smith L.E.* (Eds.). Springer handbook of metrology and testing. – Springer Science & Business Media, 2011. – 100 p.

8. *Hansen H.N., Carneiro K., Haitjema H., De Chiffre L.* Dimensional micro and nano metrology. CIRP annals. – Vol. 55. – Iss. 2. – 2006. – P. 721-743.

9. *Bland J.M., Altman D.G.* Measurement error. BMJ: British medical journal. – Vol. 312(7047). – 1996. – 1654 p.

10. *Diaa F. Elkott.* Automatic Sampling for CMM Inspection Planning of Free Form Surfaces / Diaa F. Elkott. Windsor. – Canada: Ontario, 2011. – 162 p.

11. EN ISO 15530-3:2011 Geometrical product specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards.

12. *Caulfield H.J., Ludman J., Shamir J.* (1999). Fuzzy Metrology. In Fuzzy Theory Systems. – 1999. – P. 747-758.

13. *Fuller W.A.* Measurement error models. – John Wiley & Sons, 2009.

Катаєв Д.А., Квашук Д.М., Думбрава С.М.

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Пропозиції щодо використання теорії нечітких змінних для вимірювання механічних величин мають перспективу у сфері формалізованої інформації, коли існує невизначеність, а традиційними методами отримати чіткі параметри вимірювальної величини досить складно у зв'язку з рядом об'єктивних причин. У статті представлені результати теоретичного дослідження можливостей вимірювання механічних величин з використанням засобів теорії нечітких змінних. Розглядається координатно-вимірювальна рука (КВР) як інструмент для контролю точності розмірів деталей, а також перетворювач оберտальних параметрів електродвигуна. Кожен із способів вимірювання зазначених фізичних величин має свої особливості контролю точності та достовірності отриманих даних. Тому, з метою дослідження властивостей теорії нечітких множин, під час її застосування у різних вимірювальних засобах, було проведено ряд експериментів над моделями вимірювання оберտального моменту та геометричних характеристик фізичних об'єктів. Для цього висвітлено принцип роботи КВР та її компонентів, описано методи та інструменти, які використовуються для калібрування КВР, з метою забезпечення її високої точності та надійності. Представлено методи та засоби вимірювання оберտальних моментів електродвигунів. Проведено моделювання точності отриманих даних, з використанням зазначених вимірювальних методик, для цього було використано ряд математичних моделей, які враховують похибку вимірювальних засобів. Наведено порівняння результатів дослідження, що характеризують інструменти теорії нечіткої логіки, як універсальний засіб для визначення достовірності отриманих даних під час вимірювання механічних величин.

Ключові слова: електродвигун, теорія нечітких множин, обертальний момент, координатно-вимірювальна рука, похибка вимірювання, координатні вимірювання, метод розрахунку.

Kataiev D.A., Kvashuk D.M., Dumbrava S.M.

ACCURACY OF MEASUREMENT OF MECHANICAL QUANTITIES USING THE THEORY OF FUZZY SETS

Proposals regarding the use of the theory of fuzzy variables for measuring mechanical quantities have a perspective in the field of formalized information, when there is uncertainty, and it is quite difficult to obtain precise parameters of a measurement quantity by traditional methods due to a number of objective reasons. The article presents the results of a theoretical study of the possibilities of measuring mechanical quantities using the tools of the theory of fuzzy variables. The coordinate measuring arm (CMM) is considered as a tool for controlling the accuracy of the dimensions of parts, as well as a converter of the rotational parameters of the electric motor. Each of the methods of measuring the specified physical quantities has its own characteristics of controlling the accuracy and reliability of the obtained data. Therefore, in order to study the properties of the theory of fuzzy sets, during its application in various measuring instruments, a number of experiments were conducted on models for measuring the rotational moment and geometric characteristics of physical objects. For this purpose, the working principle of the KVR and its components is highlighted, the methods and tools used for the calibration of the KVR are described, in order to ensure its high accuracy and reliability. Methods and means of measuring torques of electric motors are presented. Modeling of the accuracy of the obtained data was carried out, using the specified measurement methods, for this a number of mathematical models were used, which take into account the error of measuring devices. A comparison of the research results characterizing the tools of the theory of fuzzy logic as a universal tool for determining the reliability of the obtained data during the measurement of mechanical quantities is given.

Keywords: *electric motor, theory of fuzzy sets, torque, coordinate measuring arm, measurement error, coordinate measurements, calculation method.*