

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

Федорченко С.В.,
orcid.org/0000-0002-2819-9934,

Кудренко С.О., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-0759-3908,

Корочкін О.В., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6569-5849

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Національний авіаційний університет

dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua
serhii.fedorchenko@npp.nau.edu.ua
stanislava@i.ua

Вступ

В промислових умовах завдання підвищення точності вимірювань пов'язано із підвищенням точності управління технологічними процесами та зниженням втрат, які викликані похибками вимірів. Тому, ефективними виявляються тільки такі способи і методи підвищення точності вимірювань, які дозволяють зменшити домінуючу складову похибки вимірювань, або кілька складових, що утворюють у сумі значну частину цієї похибки.

Виявлення причин та мінімізація похибок вимірювання, а також вибір способів вимірювання є основними етапами вимірювального процесу. Проте, кожен окремий випадок, що обумовлений вимогами до вимірювальних засобів та умовами, в яких вони використовуються потребує окремих рішень. Так, з метою деталізації похибок та розробки методів зменшення їх впливу на результат вимірювання, їх розподіляють на систематичні та

випадкові, що є зручним прийомом для аналізу. Разом з тим, виявлення оптимальних способів мінімізації похибок вимірювальних засобів потребує більш детальної класифікації, пов'язаної як із причинами їх виникнення, так і вимірювальними потребами. Важливим аспектом в цьому напрямку виступає моделювання вимірювальних каналів з урахуванням тих параметрів, які притаманні конкретному вимірювальному середовищу та засобу вимірювання. Тому, існує потреба в удосконаленні засобів моделювання вимірювальних процесів шляхом максимального доведення імітаційної складової до реальних вимірювальних умов.

Аналіз досліджень та публікацій

Загальна класифікація похибок вимірювальних приладів (табл. 1) дозволяє визначити окремі шляхи їх мінімізації для окремих випадків.

Таблиця 1. Класифікація похибок вимірювальних приладів, [1-3]

Класифікаційна ознака	Похибка	Характеристика
1	2	3
За формою числового вираження	Абсолютна	представлена, як алгебраїчна різниця між результатом виміру та дійсним його значенням.
	Відносна	виражена відношенням абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини
За закономірностями прояву	Випадкова	складова похибки результату вимірювання, що змінюється випадковим чином при повторних вимірах, проведених з однаковими періодами, однієї фізичної величини.
	Систематична	складова похибки результату виміру, що залишається постійною чи закономірно змінюється при повторних вимірах однієї фізичної величини.
	Груба	похибка результату окремого виміру, що входить до ряду вимірів, які для цих умов різко відрізняються від інших результатів цього ж ряду

Закінчення таблиці 1.

1	2	3
За видами джерел похибки	Методична	складова систематичної похибки вимірів, обумовлена недосконалістю прийнятого методу вимірів
	Інструментальна	похибка, яка залежить від застосованого засобу вимірювання
	Суб'єктивна	складова систематичної похибки вимірів, обумовлена індивідуальними особливостями оператора.

Так, способи мінімізації інструментальних похибок залежать від методики вимірів, особливості перетворення сигналу, стабільності генератора, що задає тактову частоту сигналу, вібрації, температури, електромагнітних перешкод, тощо.

Дослідження спрямовані на виявлення систематичних похибок більше орієнтовані на методи статистики [4].

Корегування похибок реалізується з використанням математичних моделей вимірювальних каналів, які разом із заданими алгоритмами вимірювання

використовують відомі залежності, що лежать в основі перетворення сигналу. До основних методів корекції похибки належать методи зразкових сигналів та тестові методи, принцип реалізації яких побудований на функції перетворення засобів вимірювання в процесі виконання циклу спеціально організованих вимірів [5-6].

Корекція може здійснюватися, як автоматично, так і діями оператора. На практиці, частіше зустрічається другий варіант. Методи підвищення точності вимірювань мають наступну класифікацію (рис. 1)

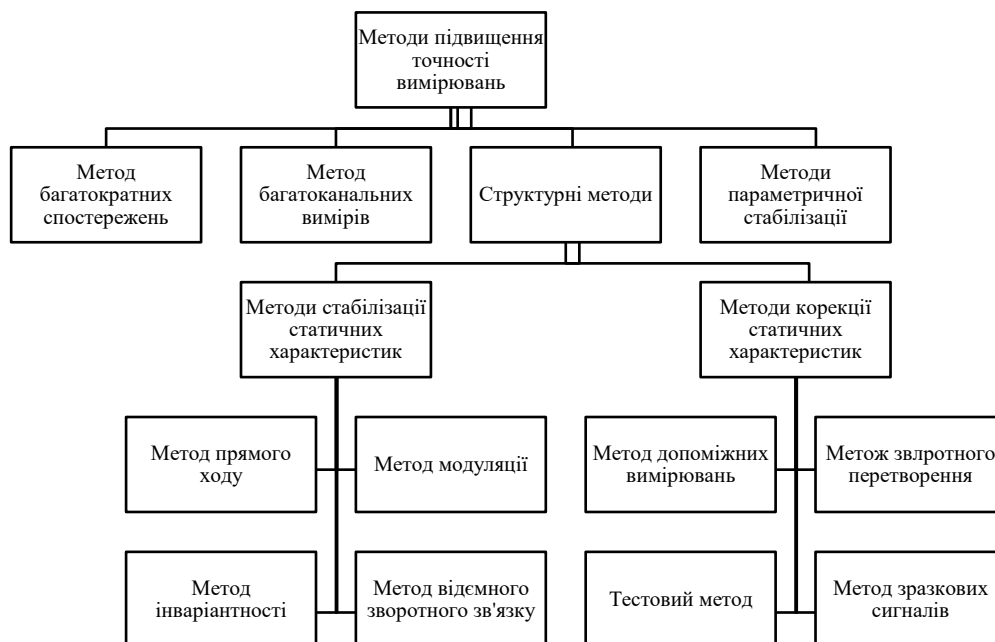


Рис. 1. Методи підвищення точності вимірювань [1]

У відповідності до рис. 1, *метод багаторазових спостережень* полягає в тому, що за деякий певний інтервал часу проведення вимірювання виконується кілька спостережень. Після чого обчислюється середнє арифметичне значення отриманих величин та проводиться оцінка середньоквадратичного відхилення результату вимірювання.

Метод багатоканальних вимірів аналогічний попередньому, проте в даному випадку використовується декілька ідентичних за характеристиками паралельних каналів. Зазначені методи дозволяють зменшити випадкову складову похибки.

Метод параметричної стабілізації полягає у стабілізації статичної характеристики засобів вимірювань, що досягається шляхом виготовлення точних та

стабільних вимірювальних елементів, параметри яких не залежать від зовнішніх дестабілізуючих факторів, таких, як: температура, стабільність живлення, електромагнітні перешкоди та ін. Метод дозволяє зменшити систематичну та випадкову похибки.

Структурні методи включають в себе додаткові вимірювальні елементи, які забезпечують підвищення точності засобів вимірювання використовуючи додаткові інформаційні параметри. Їх поділяють на методи, які забезпечують стабілізацію статичної характеристики вимірювальних засобів, та методи, що базуються на корекції цієї характеристики.

Метод негативного зворотного зв'язку реалізується із використанням перетворювачів вихідного сигналу у вхідний. Застосування такого методу дозволяє зменшити мультиплікативну складову похибки та складову не лінійності. Адитивна похибка при цьому не змінюється. Такий метод, у той же час призводить до зменшення чутливості вимірювального засобу.

Метод інваріантності включає в себе, крім стандартного вимірювального каналу, ще й порівняльний, до якого не подається вхідний сигнал, але який знаходиться під впливом деякої величини, що впливає на результат вимірювання. Параметри порівняльного каналу підібрані так, що зміна сигналу під дією додаткової величини, що впливає на результат вимірювання ідентична зміні сигналу вимірювального каналу під дією цієї величини. Таким чином збурення, які викликані додатковою вимірювальною величиною, надходять до вимірювального засобу по двох каналах. Різниця сигналів вимірювального та порівняльного каналів забезпечує незалежність вихідного сигналу від названої впливової величини. Таким чином, метод забезпечує виключення додаткової похибки, яка викликана окремим впливом на вимірювальний сигнал.

Метод модуляції дозволяє зменшити похибки від сил тертя та явищ поляризації.

Метод прямого ходу забезпечує періодичне відключення чутливого елемента

засобу вимірювання та подачі на вхід нульового сигналу, що дозволяє уникнути похибки варіації.

Метод допоміжних вимірів дозволяє врахувати вплив додаткових похибок на результат вимірювання. Для цього здійснюється вимірювання додаткових інформаційних параметрів, а також розрахунку функціональних залежностей їх впливів на результат вимірювання. Це здійснюється за допомогою обчислювального пристрою, побудованого з урахуванням функцій впливу, що автоматично коригує вихідний сигнал.

Метод зворотного перетворення дозволяє використовувати у складі вимірювальних засобів, крім прямого вимірювального каналу, зворотній вимірювальний канал, який має більшу точність. Результат вимірювання отримується шляхом серії вимірювань двох каналів, порівнюючи. На основі чого формується сигнал коригування. Це метод дозволяє зменшувати залежно від алгоритму корекції адитивну та мультиплікативну похибки засобів вимірювань.

Метод зразкових сигналів полягає у визначенні у кожному вимірювальному циклі функції перетворення засобу вимірювань за допомогою зразкових сигналів. Метод реалізує автоматичне градування засобів вимірювання у кожному циклі. Цикл включає в себе вимірювання фізичної величини, що надходить на вхід засобу вимірювання, а також серії окремих вимірювань зразкових мір. Метод дозволяє зменшити адитивну та мультиплікативну похибку, а також похибку нелінійності.

Тестовий метод зводиться до проведення сукупних вимірів, де в кожному вимірювальному циклі крім вимірювання фізичної величини, що надходить на вхід засобу вимірювань, здійснюється вимірювання окремих величин (тестів), кожна з яких формується з тестової міри та вимірюваної величини. Результат вимірювання формується шляхом обчислення співвідношень між тестовими та вхідними величинами.

Практична реалізація даних методів, залежить від умов використання вимірювальних перетворювачів та вимог до їх точності, проте найчастіше зустрічаються із завданням корекції адитивної та мультиплікативної складових систематичної похибки.

Абсолютна похибка з урахуванням адитивної та мультиплікативної складової

$\Delta(x)$, може бути описана наступним виразом:

$$\Delta(X) = \Delta_0 + \gamma_0 x, \tag{1}$$

де: Δ_0 – адитивна похибка; $\gamma_0 x$ – мультиплікативна похибка.

При адитивній корекції похибки вимірювальних засобів, зменшення похибки здійснюється за допомогою зміщення функції перетворення (рис. 2).

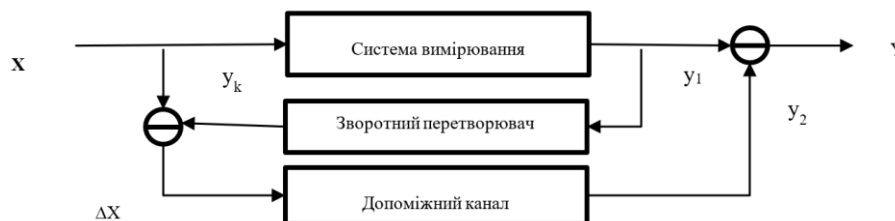


Рис. 2. Схема вимірювального перетворювача з адитивною корекцією похибки, [7]

На рис. 2 відображено одну з найбільш розповсюджених структурних схем засобів вимірювання з адитивною корекцією. У цій схемі операція виділення сигналу похибки ΔX відбувається в результаті одночасного, або різночасового віднімання двох сигналів – вхідного X та зворотного u_k . Він підсилений допоміжним каналом, який видає різницевий сигнал u_2 ,

що використовується для введення поправок у засіб вимірювання.

Засоби вимірювання з мультиплікативною корекцією похибок здійснюється за рахунок виділення похибок вимірювання та управління коефіцієнтом перетворення з метою мінімізації похибки (рис. 3).

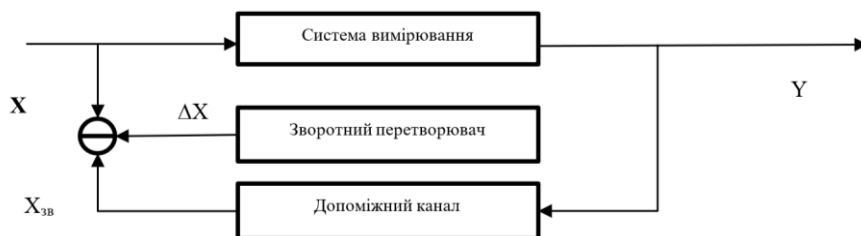


Рис. 3. Структурна схема засобу вимірювання з мультиплікативною корекцією похибки [8]

Характеристика перетворення такого способу має вигляд:

$$Y = (K + K_s S)X + D_x, \tag{2}$$

де: K – коефіцієнт перетворення засобу вимірювання; $K_s S$ – зміна коефіцієнта перетворення засобів вимірювання під дією сигналу S . У такий спосіб можна коригувати адитивні та мультиплікативні похибки, проте при переважанні адитивної похибки корекція здійснюється лише в одній точці шкали засобу вимірювання.

Таким чином, для покращення потреб коригування похибки необхідні ефективні алгоритмічні методи підвищення

точності вимірів. До таких можна віднести методи зразкових сигналів та тестові методи (рис. 1, таб. 1), в основі яких лежить функціональне перетворення засобів вимірювання під час виконання циклу спеціально організованих вимірів.

Мета

На основі досліджених методів коригування похибки, побудувати модель вимірювального перетворювача обертового моменту електродвигуна з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів.

Основна частина

Моделювання перетворювача обертового моменту індуктивного типу реалізовано з використанням програмної бібліотеки Matplotlib мовою програмування Python. В даній моделі враховано такий дестабілізуючий фактор, як вібрація. Структурна схема представлена на рис. 4.

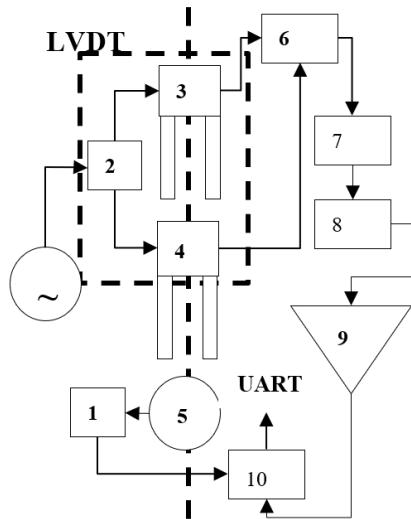


Рис. 4. Схема цифрової передачі вимірювального сигналу

1 – накопичувач сигналу; ~ – генератор;
2, 3, 4 – котушки індуктивності; 5 – датчик кута повороту/частоти обертання; 6 – перетворювач;
7 – фільтр сигналів; 8 – підсилювач сигналу; 9 – АЦП; 10 – мікроконтролер.

Завданням корекції сигналу $y(t)$ є визначення значень вхідного параметра $x(t)$ з урахуванням оператора K , що характеризує динамічні властивості перетворювача та його апаратну функцію. Воно може бути вирішено реалізацією оператора K_1 , зворотному оператору K , при відповідній обробці значень сигналу $y(t)$.

Функція перетворення вимірювального каналу для перетворювача обертового моменту електродвигуна має наступний вигляд [9]:

$$W_y(S) = \frac{I_{я}(S)}{U_y(S)} = \frac{k_I S}{(T_m T_e S^2 + T_m S + 1)}, \quad (3)$$

де: $T_m = \frac{J R_{я}}{C_w C_e}$ – механічна постійна часу двигуна; $T_e = \frac{L_{я}}{R_{я}}$ – електротехнічна постійна часу роботи двигуна; $k_I = \frac{J}{C_w C_e}$ – коефіцієнт передачі по струму; $I_{я}$ – струм в

якірному ланцюгу ЕД; $R_{я}$ – опір якірного ланцюга, що рівний сумі опорів якірних обмоток ЕД та вхідного опорів підсилювача, Ом; $L_{я}$ – сума індуктивностей якірного ланцюга двигуна та вихідного ланцюга підсилювача, Гн; J – момент інерції якоря, Нм²; C_e – коефіцієнт моменту сили, Н·м; C_w – швидкості, В·с/рад; s – оператор Лапласа; U_y – напруга.

Результат моделювання з урахуванням вібрації представлено на рис. 4, де було застосовано метод зворотних перетворень вимірювального каналу з використанням фільтра Ханна (Хеммінга), в основі якого лежить згладжування розривів на початку та в кінці імпульсного сигналу [10]:

$$\omega(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), 0 \leq n \leq M-1, \quad (4)$$

де: M – ширина вікна.

В результаті коригування похибки, отримане середньоквадратичне відхилення склало 1.82, що дозволило зменшити похибку з 2.96 до 1.81.

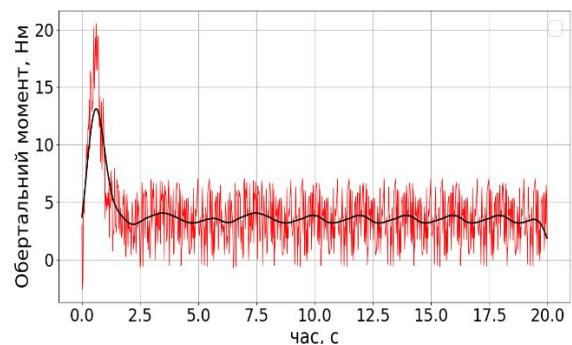


Рис. 5. Часові характеристики залежності обертового моменту в режимі корегування похибки зворотного перетворення з використанням фільтра Хеммінга.

Побудовано з використанням Matplotlib

Висновки

Моделювання роботи вимірювального перетворювача з використанням функції перетворення (3) та розглянутого методу корекції похибки вимірювального каналу, дозволило зменшити адитивну похибку використовуючи згладжуючий фільтр Хеммінга. Разом з тим, нелінійність, яка обумовлена температурним впливом на зміну пружності торсіонного валу

електродвигуна не була врахована, що вимагає подальшого удосконалення даної моделі, шляхом застосування методу корекції відповідної складової похибки.

Література

1. Yi G.Y. Statistical Analysis with Measurement Error or Misclassification: Strategy, Method and Application, 1st edition. – Springer, 2017. – 506 p.

2. Fuller W.A. Measurement Error Models. – Wiley, 2006. – 440 p.

3. Morris A.S. Measurement and Instrumentation Principles. – 2001. – 491 p.

4. Васілевський О.М. Статистичні методи виявлення систематичних похибок вимірювань / О.М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 9-12.

5. Harrison G. Meteorological Measurements and Instrumentation. – Wiley, 2015. – 280 p.

6. Skripnik Yu.A. Improving the Accuracy of Measuring Instruments. – K.: Tekhnika, 1976. – 264 p.

7. Балашов В.О., Дащенко О.Ф., Квашиков В.П. Метрологія у галузі зв'язку. Книга 1. Загальні електрорадіовимірювання: Посібник / Л.В. Коломієць, П.П. Воробієнко, М.Т. Козаченко, М.Б. Налісний, Л.О. Козаченко, О.В. Грабовський // – Одеса: ТОВ «ВМВ», 2009. – 480 с.

8. Shi, D., Tylavsky, D.J., & Logic, N. An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. IEEE Transactions on Smart Grid. – № 3(4). – 2012. – P. 1575-1583.

9. Ilic-Spong M., Miller T.J., MacMinn S.R. & Thorp J.S. Instantaneous torque control of electric motor drives. IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. PE-2. – № 1. – 1987. – С. 55-61.

10. Douglas A. Time Sequence Analysis in Geophysics. E.R. Kanasewich (University of Alberta Press). Geophysical Journal International. – Vol. 43. – Iss. 3. – 1975. – P. 1026.

Квашук Д.М., Федорченко С.В., Кудренко С.О., Корочкін О.В.

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У статті досліджуються методи підвищення точності вимірювальних приладів. Розглядаються причини виникнення похибок, а також способи їх ідентифікації. Проводиться аналіз методів зменшення похибок та їх корегування. Досліджуються програмно-апаратні способи мінімізації похибок вимірювальних приладів, які виникають у вимірювальних каналах. На основі дослідження існуючих методів корекції похибки, здійснено моделювання вимірювального каналу для перетворювача обертового моменту електродвигуна та проведено аналіз результатів. На підставі отриманих даних розроблено рекомендації щодо застосування вимірювальних перетворювачів в залежності від вимірювальних потреб та умов застосування.

Ключові слова: точність, похибка, обертовий момент, вимірювальний перетворювач, вимірювальний канал, зворотній зв'язок.

Kvashuk D.M., Fedorchenko S.V., Kudrenko S.O., Korochkin O.V.

METHODS OF INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING VERSION WATCHES

The article examines methods of increasing the accuracy of measuring devices. The causes of errors, as well as methods of their identification, are considered. An analysis of error reduction and correction methods is carried out. Software and hardware methods of minimizing the errors of measuring devices, which are reflected in the measuring channels, are being studied. Based on the study of existing methods of error correction, modeling of the measuring channel for the torque converter of the electric motor was carried out and the results were analyzed. Based on the received data, recommendations were developed for the use of measuring transducers depending on the measuring needs and application conditions.

Key words: accuracy, error, torque, measuring transducer, measuring channel, feedback.