

**Д. М. КВАШУК**

кандидат економічних наук, доцент,  
докторант кафедри електроенергетичних систем та технологій  
Національний авіаційний університет  
ORCID: 0000-0002-4591-8881

**О. Є. ЛІПКОВ**

студент кафедри бізнес-аналітики та цифрової економіки  
Національний авіаційний університет  
ORCID: 0009-0008-3507-9210

## МЕТОД АВТОМАТИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ

У статті розглядається проблема виявлення систематичних похибок, що виникають у перетворювачах напруги. Такі похибки можуть впливати на точність вимірювальних приладів, що, у свою чергу, є критичною складовою при забезпеченні надійної та ефективної їх роботи. Розглядаються шляхи вирішення проблеми корекції систематичних похибок, шляхом аналізу алгоритмів та методів обробки вимірювальних даних. Розкривається важливість вирішення цієї проблеми в загальній концепції вимірювань. Запропоновано класифікацію систематичних похибок, що може допомогти в розумінні їх природи та впливу на результати вимірювань. Особливу увагу приділено методу, який базується на стабілізації функції перетворення з метою зменшення чутливості до дестабілізуючих факторів. Метод оснований на нейронній мережі, що розширює можливості діагностики та контролю роботи електродвигунів шляхом визначення оберտального моменту по таким параметрам, як напруга, струм та кутова швидкість. Запропонований метод враховує нелінійність вимірювального каналу, що є критично важливим аспектом при роботі з електродвигунами. Нелінійність може виникати в результаті взаємодії різних фізичних процесів у системі. Це відкриває нові перспективи в області промислової автоматизації, оскільки точне визначення оберտального моменту є критично важливим для оптимізації роботи електромеханічних систем. В процесі дослідження було з'ясовано, що застосування цього методу дозволяє не тільки прогнозувати обертальний момент, а й значно покращити якість вимірювань шляхом фільтрації вимірювального каналу. Фільтрація вимірювального каналу дозволила зменшити вплив зовнішніх факторів, таких як шуми, коливання напруги, температурні зміни та інші, що можуть спотворювати результати вимірювань.

**Ключові слова:** похибка, вимірювання, обертальний момент, електродвигун, автокорекція, прилад, точність.

**D. M. KVASHUK**

Ph.D. in Economics, Associate Professor,  
Doctoral Student at the Department of Electrical Energy Systems  
and Technologies  
National Aviation University  
ORCID: 0000-0002-4591-8881

**O. YE. LIPKOV**

Student at the Department of Business Analytics and Digital Economy  
National Aviation University  
ORCID: 0009-0008-3507-9210

## A NEW METHOD OF AUTOMATIC CORRECTION OF SYSTEMATIC ERRORS OF VOLTAGE CONVERTERS

The article deals with the problem of detecting systematic errors arising in voltage converters. Such errors can affect the accuracy of measuring devices, which, in turn, is a critical component in ensuring their reliable and efficient operation. Ways to solve the problem of correcting systematic errors are considered by analyzing algorithms and methods of processing measurement data. The importance of solving this problem in the general concept of measurements is revealed. A classification of systematic errors is proposed, which can help in understanding their nature and impact on measurement results. Special attention is paid to the method based on the stabilization of the transformation function in order to reduce the sensitivity to destabilizing factors. The method is based on a neural network, which expands the possibilities of diagnostics and control of electric motors by determining the torque by parameters such as voltage, current and angular velocity. The proposed method takes into account the nonlinearity of the measuring channel, which is a critically important aspect when working with electric motors. Nonlinearity can arise as a result of the interaction of

various physical processes in the system. This opens up new perspectives in the field of industrial automation, as accurate determination of torque is critical for optimizing the operation of electromechanical systems. During the research, it was found that the application of this method allows not only to predict the torque, but also to significantly improve the quality of measurements by filtering the measuring channel. Filtering the measuring channel made it possible to reduce the influence of external factors, such as noise, voltage fluctuations, temperature changes and others, which can distort the measurement results.

**Key words:** error, measurement, torque, electric motor, autocorrection, device, accuracy.

### Постановка проблеми

В переважна кількість сенсорів має вихідні аналогові сигнали, які піддаються процесу перетворення в цифрову форму. Однак, проблемою, з якою стикаються датчики цього типу, є нелінійність окремих характеристик та вразливість до впливу дестабілізуючих факторів. Похибка, пов'язана з не лінійністю може бути апроксимована за допомогою лінійних відрізків, скорегована на основі градувальних таблиць, оброблена спеціальними корегуючи ми алгоритмами, тощо. Разом з тим, існує проблема корегування похибок вимірювальних величин, пов'язана з визначенням контрольних точок, які використовуються для перетворення вихідної аналогової величини. Для вирішення цих задач, зазначений діапазон розділяється на сегменти, при цьому кордони цих сегментів мають відповідати контрольним значенням, для яких теоретично відомі точні значення вихідних кодів. Це дозволяє компенсувати нелінійність перетворення та збільшити точність. Проте, вплив додаткових дестабілізуючих факторів, значною мірою ускладнює формування контрольних точок, що обумовлено, як випадковими похибками, так і особливостями роботи самих перетворювачів. Тому, зважаючи на те, що відомі теоретичні методи та моделі корегування точності вимірювальних приладів широко описують залежності багатьох перетворювачів, окремі види дестабілізуючих факторів, які недостатньо вивчені, потребують розпізнавання. Для цього потрібен експериментально-статистичний підхід, який дозволяє детально описати закономірності конкретних явищ в конкретних умовах часу. Але, для того, щоб сформувавши класифікацію окремих впливів на вимірювальну систему, потрібні засоби для навчання, наприклад засоби машинного навчання, або застосування штучних нейронних мереж.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Методи автоматичної корекції можна розбити на три групи [1, 2, 3, 4]: методи, що коригують нульову точку характеристики перетворювача напруги при її зміщенні щодо встановленої під час градування – автокорекція нуля; методи, що коригують масштаб перетворення, зміна якого пов'язана із зміною кута нахилу характеристики перетворювача напруги – автокорекція швидкості нахилу зміни вихідного сигналу; методи, що виправляють вплив нелінійності характеристик перетворювача напруги – автокорекція нелінійності.

Залежно від форми подання коригувальних сигналів, можна говорити про аналогові та цифрові методи автокорекції. При використанні аналогових методів автокорекції охоплюються або окремі аналогові елементи, або повністю вся аналогова частина перетворювачів напруги. В свою чергу, до переваг аналогових методів слід віднести відносну простоту схемних рішень. Проте, складність полягає у досягненні необхідних перехідних корегувальних характеристик. Тут, особливу увагу слід приділити систематичним похибкам. Загально відома класифікація яких, має наступний вигляд [5, 6, 7] (рис. 1).

Серед них, такими що потребують найбільшої уваги можна вважати метод автокорекції швидкості нахилу зміни вихідного сигналу. Оскільки діагностувати вплив дестабілізуючих факторів на масштаб перетворення в умовах високого коефіцієнту підсилення вимірювального каналу, досить складно, необхідно визначити структуру та рівень впливу дестабілізуючих факторів з метою подальшої фільтрації. Перетворення аналогового сигналу можна представити наступним виразом:

$$\frac{dy}{dt} = k \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

де  $y$  – вихідний сигнал;  $t$  – час;  $x$  – швидкість нахилу;  $k$  – коефіцієнт підсилення.

Так, при збільшенні  $k$  збільшується і вплив дестабілізуючих факторів. Тому, для визначення похибок квантування, в умовах невизначеності, де вихідний аналоговий сигнал, наприклад, синусоїдальний, швидко змінюється (рис. 2), зробити розбивку неперервної величини на скінченну кількість інтервалів зміни вимірювальної величини  $\Delta u_n$ , що відповідають заданій точності, досить складно.

Для вирішення цієї проблеми необхідно визначити інші складові похибок, що може бути реалізовано шляхом машинного навчання, або із застосуванням нейронних мереж. Загально відомі класифікації похибок вимірювальних приладів не повною мірою відображають їх зміст [8, 9, 10], проте їх класифікацію можна розширити (рис. 3).

Для пошуку рішення та виключення впливу похибок вибирають апроксимуючу функцію, яка може бути адитивною, мультиплікативною, адитивно-мультиплікативною та функцією у вигляді ступеня поліному. На практиці найчастіше беруть лінійну апроксимуючу функцію виду:

$$y_a = Fa(x) = b + a - x, \quad (2)$$

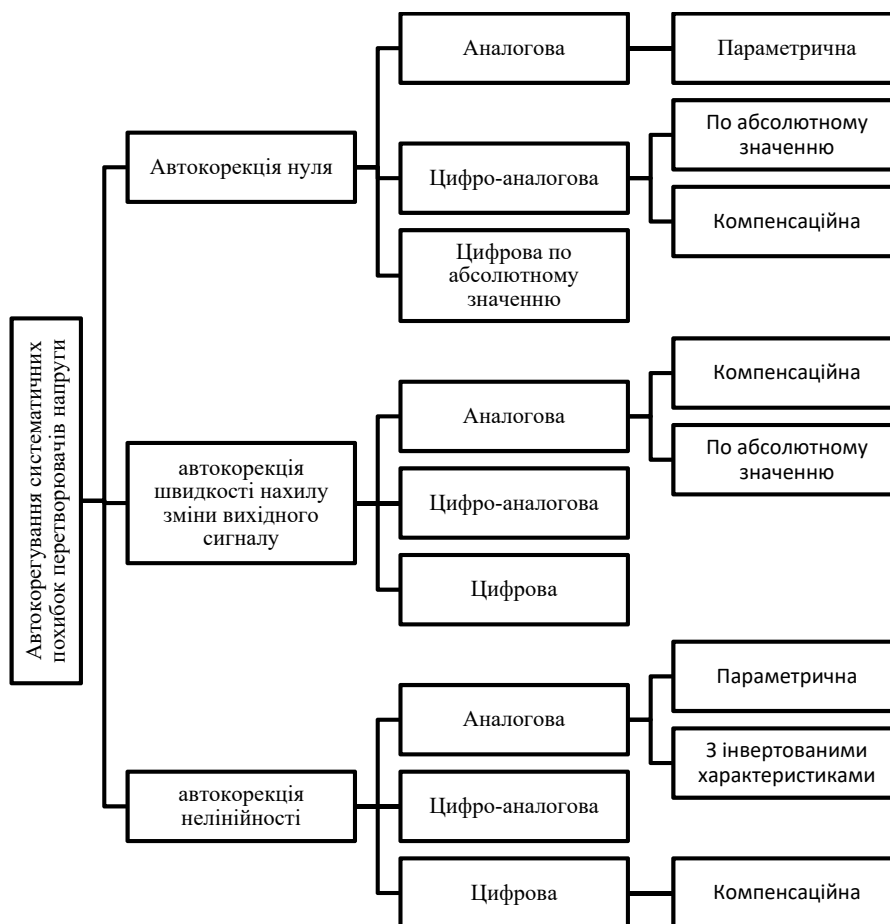


Рис. 1. Класифікація методів автокорекції систематичних похибок

Коефіцієнти  $a$  та  $b$  апроксимуючої функції визначаються на основі методу еталонних сигналів [11].

Схема реалізації яких для аналогових перетворювачів, що використовуються для корекції адитивних та мультиплікативних похибок представлена на рис. 4. Вона включає в себе вимірювальний комутатор ( $K$ ), який підключає вимірювану величину ( $x$ ) та еталонні величини ( $U_1, U_2$ ), а також аналоговий перетворювач і обчислювальний блок ( $B$ ).

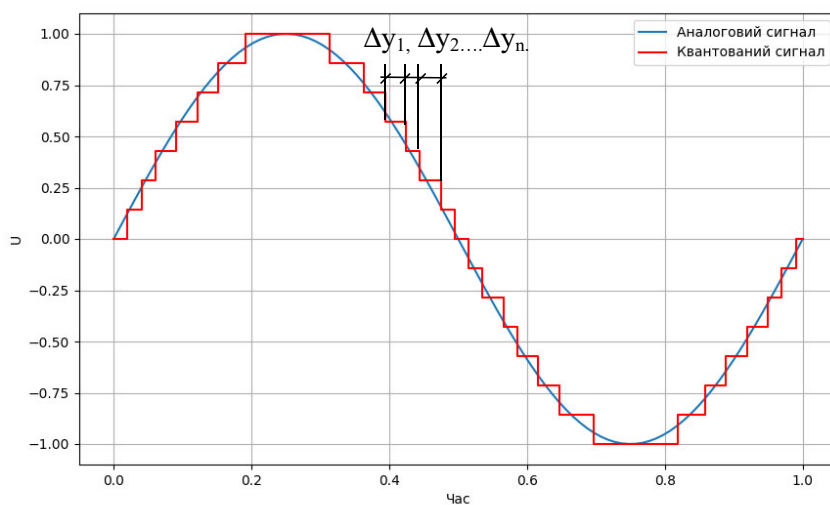


Рис. 2. Похибка квантування в умовах нелінійності вимірювального сигналу

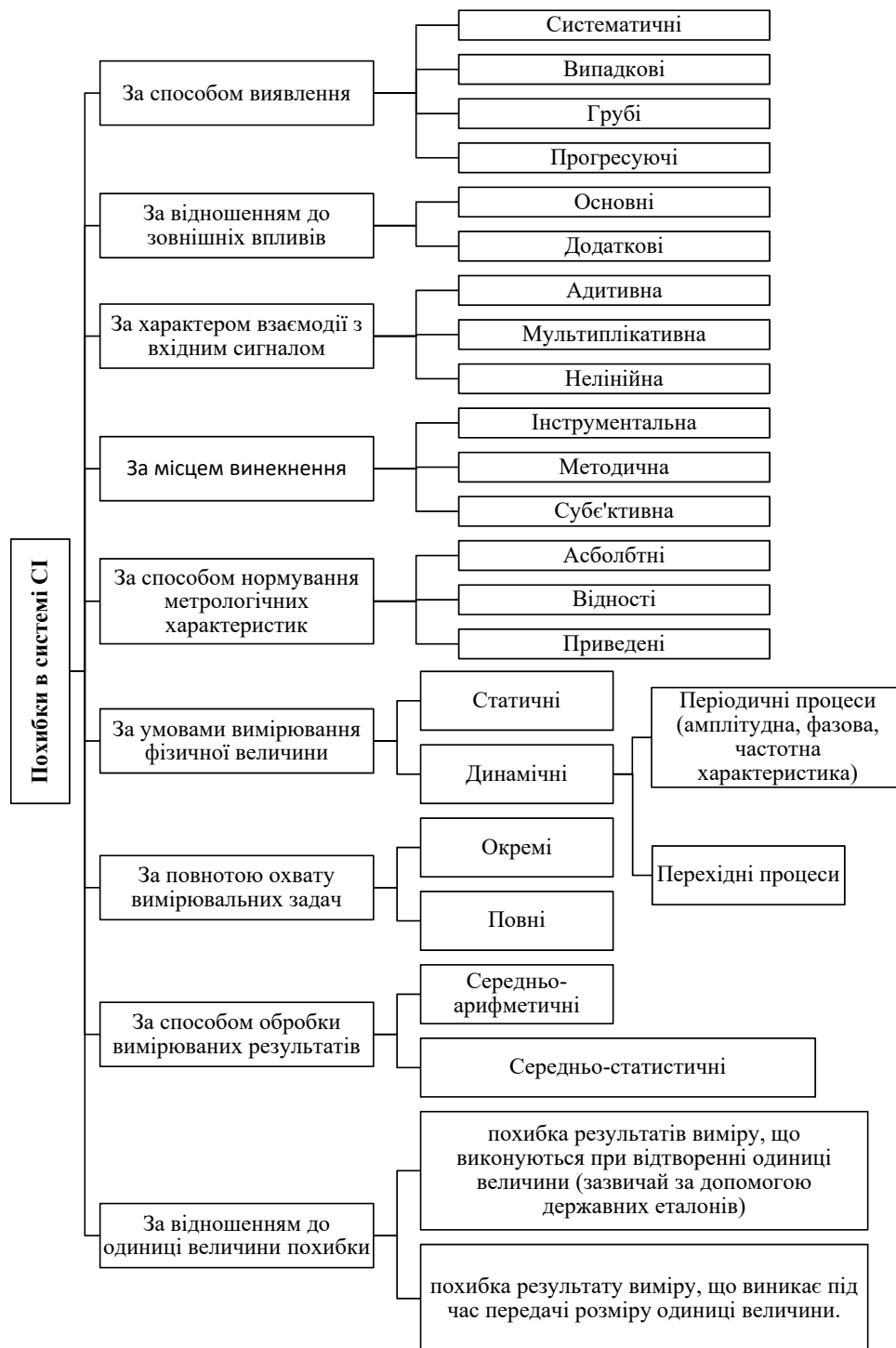


Рис. 3. Класифікація похибок вимірювальних приладів

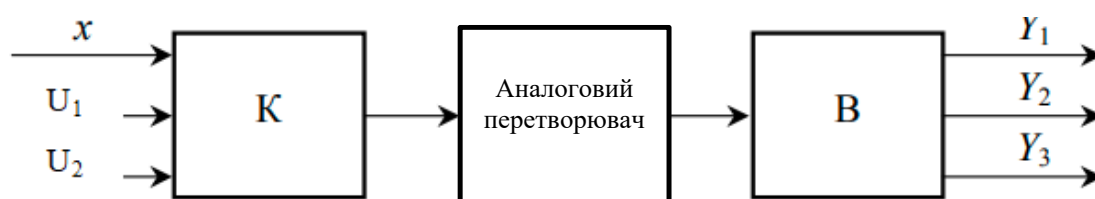


Рис. 4. Схема реалізації методу еталонних сигналів для корекції адитивної та мультиплікативної похибок аналогових перетворювачів

Реалізуючи за допомогою даної схеми три вимірювання, отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} a \cdot x + b = y_1 \\ a \cdot U_1 + b = y_2, \\ a \cdot U_2 + b = y_3 \end{cases} \quad (3)$$

де  $y_1, y_2, y_3$  – значення вихідного коду аналогового перетворювача, при подачі на його вхід відповідно величин  $x, U_1, U_2$ . Шуканими змінними є  $a, b, x$ .

Більш досконалим, що використовує зворотний зв'язок є ітераційний алгоритм автоматичної корекції похибки (рис. 4), що побудований на основі

розглянутого адитивно-мультиплікативного алгоритму у поєднанні з методом дотичних, застосовним для вирішення нелінійних задач. За методом дотичних автоматична корекція похибок досягається шляхом зміни апроксимуючої функції двох змінних  $b_i$  та  $a_i$ . Сутність роботи ітераційного адитивно-мультиплікативного алгоритму корекції похибок аналогових перетворювачів представлена на рис. 5.

Існує багато інших алгоритмів корекції похибок [12, 13], проте значна частина з них базуються на певній моделі, або припущенні про систему вимірювання. Якщо модель неправильно відображає реальні умови, або джерела похибок, то результати корекції можуть бути неточними. Навіть найкращі алгоритми корекції не можуть усунути всі похибки вимірювання без обмежень, оскільки такі фактори, як шум, не лінійність, або недосконалість датчиків, впливають на точність вимірювання. Тому, корекційні алгоритми можуть зменшити похибки, але не здатні до повного їх усунення.

**Мета статті:** вивчення систематичних похибок у перетворювачах напруги, знаходження шляхів підвищення точності вимірювань, розробка нового методу корекції за допомогою штучних нейронних мереж для підвищення точності вимірювань обертальних параметрів електродвигуна.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Штучні нейронні мережі можуть бути потенційним рішенням для вирішення багатьох проблем пов'язаних із алгоритмами корекції похибок вимірювання. Так, їх можна застосовувати для моделювання складних нелінійних залежностей між вимірювальними даними та похибкою. Вони, можуть бути корисними в адаптації до змінних умов вимірювання, а саме навчатися на основі нових даних та адаптуватися до змін в джерелах похибок, або параметрах системи. Це дає їм гнучкість і можливість враховувати динамічні зміни вимірювань. Нейронні мережі можуть автоматично вивчати оптимальні параметри корекційного алгоритму, включаючи параметри моделі та корекційні коефіцієнти. Це дозволяє їм можливість адаптуватися до різних джерел похибок і забезпечувати більш точну корекцію.

Разом з тим, це вимагає додаткових обчислювальних ресурсів та знань про їх налаштування. Крім того, враховуючи розмаїття алгоритмів і архітектур штучних нейронних мереж, важливо вибрати відповідну модель, що відповідає конкретним вимогам та особливостям проблеми корекції похибок вимірювання.

З метою апробації роботи нейронних мереж в задачах корегування статичних похибок, розглянемо практичний приклад перетворення напруги у цифровий код перетворювачем тензометричного типу обертального моменту електродвигуна, що має наступну функціональну залежність:

$$y = Q(V, Q_{step}), \quad (4)$$

де  $y$  – цифрове представлення аналогового сигналу;  $Q$  – функція квантування, яка апроксимує значення аналогового сигналу до найближчого дискретного значення;  $V$  – значення аналогового сигналу, яке підлягає перетворенню;  $Q_{step}$  – крок квантування, що визначає мінімальну зміну значення цифрового коду. При цьому у формулі не враховано ряд дестабілізуючих факторів. Тому, врахуємо наявну кількість похибок, що мають вплив на вхідні

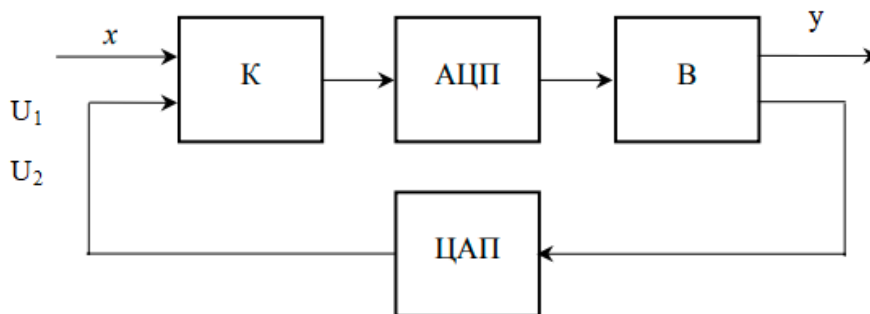


Рис. 5. Схема реалізації ітераційного алгоритму автоматичної корекції похибки аналогового перетворювача

параметри вимірювання  $x_i$ . Визначимо вихідний сигнал перетворювача  $y_i$ . Нехай мережа складається із  $L$  шарів. Кожен шар містить  $n_l$  нейронів. Функція активації для нейронів у шарі  $l$  буде позначатися як  $f_l$ . Загальна форма рівняння для нейронної мережі з  $L$  шарами та функцією активації  $f_l$  може мати наступний вигляд:

$$\hat{y} = f_L \left( \sum_{j=1}^{n_L} w_{j,i}^{(L)} f_{L-1} \left( \sum_{i=1}^{n_{L-1}} w_{j,i}^{(L-1)} f_{L-2} \left( \dots f_1 \left( \sum_{i=1}^{n_1} w_{j,i}^{(1)} x_i + b_j^{(1)} \right) \dots \right) + b_j^{(L-1)} \right) + b_j^{(L)} \right), \quad (5)$$

де  $\hat{y}$  – прогнозоване значення корегуючого чого сигналу, яке нейронна мережа повинна вивести на основі вхідних даних  $x_i$  та відповідних значень обертального моменту, тобто вихідного сигналу  $y_i$ ;  $w_{j,i}^{(L)}$  – вага, яка зв'язує вхід  $i$  нейрона з  $j$  нейроном у шарі  $L$ ;  $b_j^{(L)}$  – зсув (bias) для  $j$  нейрона у шарі  $L$ ;  $f_l$  – функція активації для нейронів у шарі  $l$ ;  $n_l$  – кількість нейронів у шарі  $l$ . Відповідно кількість похибок викликана рядом дестабілізуючих факторів має бути врахована, а систем навчена на сталонній моделі. Тоді, це рівняння виконує послідовний прохід від вхідних даних до вихідного значення, розглядаючи кожен шар нейронів окремо.

Кожен нейрон у кожному шарі приймає вхідні дані від попереднього шару, виконує лінійну комбінацію цих даних з відповідними вагами та додає зсув, а потім застосовує функцію активації до цього значення. На виході останнього шару мережі отримуємо коефіцієнт корегування загальної похибки  $\hat{y}$ , який може бути порівняним зі значенням обертального моменту  $y_i$ , тобто фактично вихідним значенням.

Функція втрат (середньоквадратична помилка) може бути представлена наступним виразом:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{\text{pred}} - y_{\text{true}})^2, \quad (6)$$

де  $L$  – значення функції втрат,  $y_{\text{pred}}$  – передбачене значення похибки,  $y_{\text{true}}$  – вихідне значення перетворювача,  $N$  – кількість елементів в навчальному наборі.

З метою проведення тестування методу автокорекції похибки аналогового перетворювача, були проведені експерименти на вимірювальному стенду, що дозволили визначити параметри складових систематичної похибки на прикладі вимірювального перетворювача обертального моменту тензометричного типу. В результаті було отримано дані для навчання нейронної мережі. Розроблено програмний код, який проводить симуляцію роботи вимірювального приладу. Так, на отриманих даних (рис. 6), а саме: струму; напруги; кутової швидкості; обертального моменту, було здійснено навчання нейронної мережі, що дозволило провести ряд експериментів з урахуванням змодельованих дестабілізуючих факторів, зокрема вібрації та нелінійності вимірювального каналу.

Порівняння навчальної вибірки отриманих даних та даних отриманих експериментальним шляхом, дозволило отримати точність запропонованої моделі, а застосування згладжуючого фільтру, дозволило реалізувати корекцію систематичної похибки (рис. 7).

### Висновки

Проблема виявлення систематичних похибок, що виникають у перетворювачах напруги, обумовлена неідеальністю самих перетворювачів та зовнішніми факторами, такими як шум, не лінійність, або зміни у параметрах системи. Систематичні похибки можуть призводити до неточних вимірювань та спотворення результатів. Для підвищення точності вимірювань необхідно скоригувати систематичні похибки за допомогою відповідних методів та алгоритмів корекції.

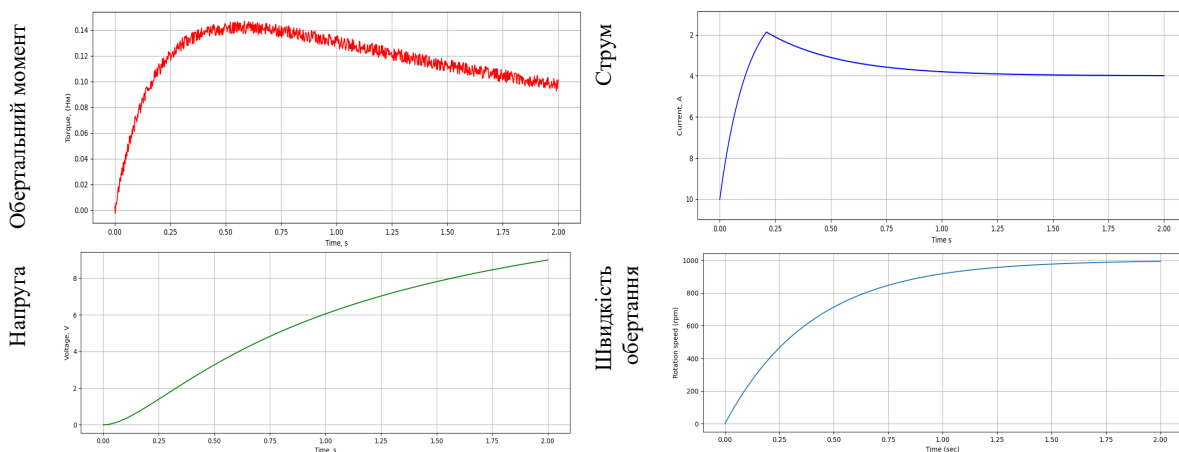
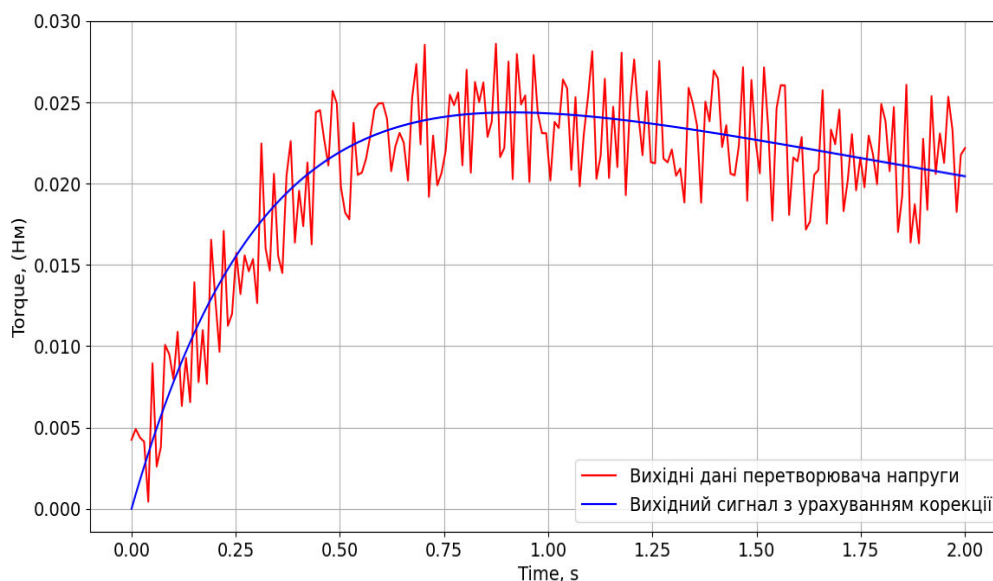


Рис. 6. Дані отримані з вимірювального стенду



**Рис. 7. Порівняння вихідного сигналу перетворювача та скоригованого сигналу з урахуванням корекції на основі нейронної мережі**

В результаті дослідження шляхів підвищення точності вимірювань систематичних похибок у перетворювачах напруги визначено, що важливим аспектом є використання методу корекції на основі стабілізації функції перетворення, корекції функції перетворення та визначення оцінки дійсного значення вхідного сигналу.

Застосування штучних нейронних мереж для стабілізації функції перетворення виявилось досить ефективним. Цей підхід дозволив підвищити точність вимірювань обертальних параметрів електродвигуна та зменшити вплив систематичних похибок у перетворювачах напруги.

#### Список використаної літератури

1. Скрипник, Ю., Юрчик, Г., & Водотовка, В. (2002). Алгоритмічний метод автокорекції та контролю систематичних похибок термоелектричних вимірювальних каналів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", (450: Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології), 199–205.
2. Юрчик, Г. (2014). Структурно-алгоритмічний метод автокалібрування термоелектричних вимірювальних каналів температури в умовах їх експлуатації. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Комп'ютерні науки та інформаційні технології, (800), 205–211.
3. Bromberg, É. M. (1971). Autocorrecting tensometric weighing systems. *Measurement Techniques*, 14(5), 691–693.
4. Gibson, J. E., & Sridhar, R. (1963). A new dual-input describing function and an application to the stability of forced nonlinear systems. *IEEE Transactions on Applications and Industry*, 82(66), 65–70.
5. Ночвай, В. М., & Петрук, В. Г. (2008). Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки», (4 (47)), 43–48.
6. Свтух, П. С., Куземко, Н. А., & Бабюк, С. М. (2010). Структура алгоритмів автоматичної компенсації систематичних похибок масштабуючих вимірювальних перетворювачів.
7. Кондратов, В. Т. (2001). Основи теорії автоматичної корекції систематичних похибок вимірювання фізичних величин при нестабільній і нелінійній функції перетворення датчика: дис. д-ра техн. наук: 05.11. 15 і 05.11. 01/ Кондратов Владислав Тимофійович.
8. Ковтонюк, І. Ю., & Фостенко, К. В. (2017). Застосування регресійного аналізу для знаходження та усунення змінних систематичних похибок (Doctoral dissertation, Видавництво «Молодий вчений»).
9. Воловик, А. Ю., Осадчук, О. В., Червак, О. П., & Шутило, М. А. (2017). Оптимізація систематичних похибок при виконанні комплексних спостережень. Вісник Хмельницького національного університету. № 4 (251): 214–218.
10. Кондрашов, С. І., Григоренко, І. В., & Глоба, С. М. (2016). Методи додаткових вимірювань за корекції систематичних похибок ЗВТ. *Метрологія та прилади*, (1), 22–26.
11. Боднер В. А., Алферов А. В. Измерительные приборы: Учебник для вузов: В 2 т. М.: Изд-во стандартов, 1986.
12. W. Kester. ADC Architectures I: The Flash Converter. Analog Devices, MT-020 Tutorial. [www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-020.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-020.pdf)

13. W. Kester. ADC Architectures II: Successive Approximation ADC. Analog Devices, MT-021 Tutorial. [www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-021.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-021.pdf).

#### References

1. Skrypyuk, Y., Yurchyk, H., & Vodotovka, V. (2002). Alhorytmichnyi metod avtokorektsii ta kontroliu systematychnykh pokhybok termoelektrychnykh vymiriuvalnykh kanaliv [Algorithmic method of autocorrection and control of systematic errors in thermoelectric measurement channels]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika"*, 450: Kompyuterna inzheneriya ta informatsiyni tekhnolohiyi, pp. 199–205.
2. Yurchyk, H. (2014). Strukturno-alhorytmichnyi metod avtokalibrivannia termoelektrychnykh vymiriuvalnykh kanaliv temperatury v umovakh yikh ekspluatatsii [Structural-algorithmic method of autocollimation of thermoelectric measuring channels of temperature in conditions of their operation]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politehnika. Kompyuterni nauky ta informatsiyni tekhnolohiyi*, 800, pp. 205–211.
3. Bromberg, É. M. (1971). Autocorrecting tensometric weighing systems. *Measurement Techniques*, 14(5), pp. 691–693.
4. Gibson, J. E., & Sridhar, R. (1963). A new dual-input describing function and an application to the stability of forced nonlinear systems. *IEEE Transactions on Applications and Industry*, 82(66), pp. 65–70.
5. Nochvai, V. M., & Petruk, V. H. (2008). Doslidzhennia systematychnykh pokhybok vymiriuvannia potoku vyprominiuvannia tverdykh chastynok [Investigation of systematic errors in the measurement of solid particle radiation flux]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky"*, 4(47), pp. 43–48.
6. Yevtukh, P. S., Kuzemko, N. A., & Babiuk, S. M. (2010). Struktura alhorytmiv avtomatychnoi kompensatsii systematychnykh pokhybok mashtabuiuchykh vymiriuvalnykh peretvoriuvachiv [Structure of algorithms for automatic compensation of systematic errors of scaling measuring transducers].
7. Kondratov, V. T. (2001). Osnovy teorii avtomatychnoi korektsii systematychnykh pokhybok vymiriuvannia fizychnykh velychyn pry nestabilnii i neliniinii funktsii peretvorennia datchyka [Foundations of the theory of automatic correction of systematic errors in the measurement of physical quantities in the case of unstable and nonlinear sensor conversion function].
8. Kovtoniuk, I. Y., & Fostenko, K. V. (2017). Zastosuvannia rehresiinoho analizu dlia znakhodzhennia ta usunennia zminnykh systematychnykh pokhybok [Application of regression analysis for finding and eliminating variable systematic errors]. *Molodyi vchenyi*.
9. Volovyk, A. Y., Osadchuk, O. V., Chervak, O. P., & Shutylo, M. A. (2017). Optymalne otsiniuvannia systematychnykh pokhybok pry vykonanni kompleksnykh sposterezhen [Optimal estimation of systematic errors in complex observations]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 4(251), pp. 214–218.
10. Kondrashov, S. I., Hryhorenko, I. V., & Hloba, S. M. (2016). Metody dodatkovykh vymiriuvan za korektsii systematychnykh pokhybok ZVT [Methods of additional measurements for the correction of systematic errors of ZVT]. *Metroloriia ta prylady*, 1, pp. 22–26.
11. Bodner, V. A., & Alferov, A. V. (1986). *Izmeritelnye pribory [Measuring instruments]*. Moscow: Izd-vo standartov.
12. Kester, W. ADC Architectures I: The Flash Converter. Analog Devices, MT-020 Tutorial. Retrieved from [www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-020.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-020.pdf)
13. Kester, W. ADC Architectures II: Successive Approximation ADC. Analog Devices, MT-021 Tutorial. Retrieved from [www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-021.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-021.pdf)