

Квасніков В.П., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6525-9721,
e-mail: kvp@nau.edu.ua,

Квашук Д.М., к.е.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881,
e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua,

Молчанова К.В., к.т.н.,
orcid.org/0009-0003-9229-9766,
e-mail: ekaterinavk85@gmail.com,

Ільченко В.М., к.т.н.,
orcid.org/0009-0003-6569-877X,
e-mail: ibm@nau.edu.ua

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Національний авіаційний університет

Вступ

Ефективність і надійність роботи електродвигунів є ключовими факторами у широкому спектрі застосувань, від промислового виробництва до транспортних систем. Однак, дестабілізуючі фактори, такі як нестабільне живлення, механічні пошкодження, зношування компонентів, або зовнішні впливи, можуть істотно впливати на їх роботу. Традиційні методи діагностики часто не здатні вчасно виявити початкові стадії несправностей, або критичні режими роботи, що може призвести до раптових зупинок, зниження продуктивності та збільшення витрат на обслуговування. Тому, в умовах дестабілізуючих факторів, які впливають на точність вимірювальних систем, існує необхідність у створенні інтелектуальних засобів діагностики робочих характеристики електродвигунів. Такі покращення можуть бути реалізовані на основі нейронних мереж, що дозволяє виявляти критичні режими роботи, які традиційними вимірювальними засобами важко ідентифікувати.

Усе це, та багато інших потреб пов'язаних з підвищення точності вимірювальних засобів, вимагає створення інформаційно-вимірювальних систем нового покоління. Такі системи можуть бути орієнтованими на використання нейронних

мереж, що забезпечить високу точність вимірювальних приладів та відкриє можливості для ідентифікації критичних режимів роботи електродвигунів, які не можуть бути ідентифіковані стандартними вимірювальними засобами.

Аналіз досліджень та публікацій

В актуальній науковій літературі значна частина досліджень, пов'язаних із діагностикою роботи електродвигунів, концентрується на прогнозуванні їхнього зносу та неминучого руйнування. Це зумовлено збільшенням вібрацій, спричиненим зносом підшипників, а також підвищенням температури, що може свідчити про пошкодження інших критичних компонентів. Такі фактори мають прямий вплив на результати вимірювань, зокрема на точність визначення стану обладнання. Однією з особливих проблем є виявлення короткочасних стрибкоподібних відхилень від нормальних значень вимірювальних величин. Через обмежену швидкість реагування існуючих вимірювальних засобів, такі відхилення часто залишаються непоміченими, що ускладнює своєчасну діагностику та попередження серйозних ушкоджень. Дослідження за цим напрямом були проведені в багатьох працях, проте слід відзначити роботу [1], де описано

критерій визначення стрибкоподібного сигналу в умовах невизначеності, що дозволило отримати детектор:

$$g_n = S_1^n(\mu_0, \nu) - \min_{1 \leq k \leq n} S_1^k(\mu_0, \nu) > \lambda, \quad (1)$$

де g_n – значення детектора для n -го вимірювання. Це вихідний сигнал детектора, який показує, чи було виявлено стрибкоподібну зміну на даному етапі аналізу; $S_1^n(\mu_0, \nu)$ – функція сигналу для n -го вимірювання; $\min_{1 \leq k \leq n} S_1^k(\mu_0, \nu)$ – мінімальне значення функції сигналу від початку вимірювань до поточного моменту n . Цей компонент служить для Ідентифікації найменшого значення сигналу в розглянутому діапазоні, що може вказувати на нижній поріг зміни сигналу, який вважається стрибкоподібним; λ – граничне значення, що визначає чутливість детектора. Якщо різниця між поточним значенням сигналу $S_1^n(\mu_0, \nu)$ та мінімальним перевищує λ , це вважається індикатором стрибкоподібної зміни.

Такий спосіб може бути застосований для ідентифікації стрибкоподібних сигналів, але за умов стабільного сигналу. В шумоподібних умовах та перехідних режимах роботи електродвигунів він потребує корекції.

В роботі [2] запропоновано метод розпізнавання еталонного сигналу з випадковим адитивним шумом, що частково вирішує дану проблему. Методика дозволяє визначати присутність конкретних еталонних характеристик сигналу в аналізованому спектрі за допомогою оцінки вихідного сигналу та його першої похідної, незважаючи на складнощі, спричинені адитивним шумом. Так, було вирішено задачу, в якій за значеннями вихідного сигналу $y(t)$ та його першої похідної встановлено, яка з еталонних функцій присутня в поточний момент часу в аналізованому сигналі, де ϵ кінцева множина еталонних функцій $f_i(t)$, where $t \in [0; T_i]$, $i = 1, 2, \dots, M$, що характеризує стандартні сигнали. Аналізований сигнал у разі адитивної перешкоди має вигляд:

$$y(t) = kf_i(t + \tau_i) + \eta(t), \quad (2)$$

де: $f_i(t)$ – i -та еталонна функція; $\tau_i \in [0; T_i]$ – зсув у часі між сигналом та i -м еталоном; $\eta(t)$ – адитивна перешкода, про яку відомо лише те, що вона може зникати і з'являтися у випадкові моменти часу; k – коефіцієнт, значення якого невідомо. Для мультиплікативної похибки вихідний сигнал буде мати наступний вираз:

$$y(t) = kf_i(t + \tau_i)\eta(t), \quad (3)$$

Даний метод може бути застосований за умов початкового першої похідної. Але за відсутності окремих даних його реалізація буде ускладнена.

У дослідженні [3] розроблено метод, що дозволяє ідентифікувати конкретні еталонні сигнали в аналізованому спектрі в реальному часі, навіть якщо обчислення першої похідної неможливе. Метод ефективний та нечутливий до амплітуди сигналів та окремих шумів, успішно ідентифікуючи, наприклад, трикутні сигнали. Реалізація алгоритму підтвердила його ефективність, особливо у випадках, коли імпульсний шум тимчасово зникає, дозволяючи точно визначати моменти без похибок для ідентифікації сигналу.

Із зазначених досліджень випливає, що у випадкові моменти часу, коли додана імпульсна похибка зникає, аналізований сигнал $y(t)$ стає пропорційним до переданого еталонного сигналу

Таким чином, автоматично визначаються інтервали часу, коли похибка відсутня, і саме в ці моменти відбувається розпізнавання стрибкоподібного сигналу:

$$y(t) = \frac{\int_{t-h}^t y(t) dt}{\int_{t-h}^t f_i(t + \tau_i) dt} - \frac{y(t)}{f_i(t + \tau_i)}, \quad (4)$$

де: h – заданий інтервал часу; $f_i(t + \tau_i)$ – функція непропорційності сигналу при заданому зсуві по часу τ_i .

Моделювання на прикладі ідентифікації випадкових трикутних сигналів за даним методом представлено на рис. 1

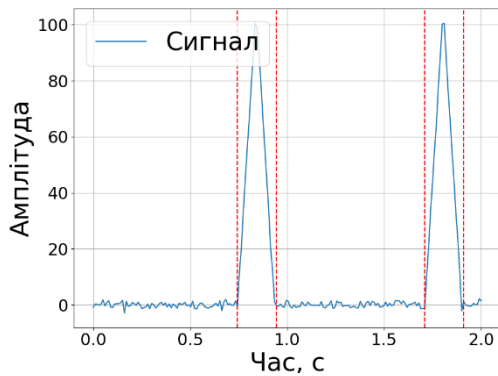


Рис. 1. Ідентифікація трикутних сигналів

Виходячи із розглянутих праць, а також розуміючи специфіку обробки шумоподібних сигналів, можна сказати, що ідентифікація стрибкоподібних сигналів є складною процедурою, особливо в умовах виникнення аномальних сигналів. Разом з тим виявлення аномальних сигналів при тестуванні електродвигунів критично для забезпечення точності та достовірності результатів, оскільки аномалії можуть виникати через електромагнітні перешкоди, коливання під час запуску, несправні датчики, або вплив змінних умов, таких як вібрація температура та вологість, тощо.

Ці проблеми можуть призводити до спотворення даних, що ускладнює аналіз. В свою чергу, традиційні вимірювальні прилади часто не в змозі ідентифікувати такі аномалії, тому використовуються інтелектуальні методи аналізу, включаючи нейронні мережі та машинне навчання, для виявлення закономірностей у сигналах [4, 5]. Так, ефективно використання електродвигунів залежить від розуміння та усунення цих аномалій за допомогою спеціалізованих підходів.

Мета

Метою даної статті є розробка інформаційно-вимірювальної системи, що використовує нейронні мережі для підвищення точності діагностики робочих характеристик електродвигунів у умовах дестабілюючих факторів. Система має на меті ідентифікувати критичні режими роботи, недоступні для традиційних методів вимірювань, забезпечуючи тим самим збільшення надійності та ефективності експлуатації обладнання.

Побудова вимірювальної системи випробування електродвигунів на базі нейронної мережі.

Пропонується вимірювальна система для випробування електродвигунів, що базується на застосуванні нейронних мереж. Така система здатна виконувати діагностику та тестування електричних двигунів, використовуючи не тільки стандартне обладнання, але й інноваційні безконтактні методи діагностики. Запропонована структура вимірювальної системи, описана у патентах [6, 7], включає як безпосередні засоби вимірювання обертальних параметрів, так і вимірювання електричних параметрів електродвигуна, забезпечуючи комплексний підхід до контролю їх стану (рис. 2).

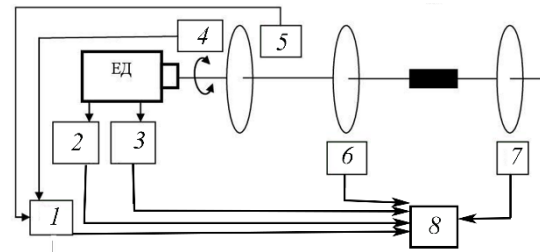


Рис. 2 структура вимірювальної системи

де: 1 – пристрій для визначення напрямку обертання валу; 2, 3 – датчики струму та напруги; 4, 5 – датчики Холла, які мають аналоговий вихідний сигнал; 6, 7 – оптичні сенсори, які використовуються для вимірювання обертального моменту, кутової швидкості та кутового прискорення валу; 8 – обчислювальний пристрій.

Вимірювання обертального моменту

Принцип дії запропонованого механізму вимірювання обертального моменту базується на створенні частотно-широкомодульованих сигналів на інформаційних каналах оптичних датчиків 6, 7 під час обертання ротора. Визначення моменту M здійснюється за часовим принципом:

$$M = f(A), \quad A = \frac{t_1}{t_2}, \quad (5)$$

де A – калібрувальний параметр вимірювального пристрою. t_1 – час між проходженням прорізу переднього вимірювального

диска через датчик 6. t_2 – час між проходженням прорізу переднього вимірювального диска через датчик 7.

В результаті перетворення імпульсних характеристики датчиків 6, 7, отримується кут скручування динамометричної пружини пропорційний моменту навантаження, яке діє на вал електродвигуна під час його роботи. Визначається таке скручування шляхом вимірювання різниці між часовими характеристиками сигналів датчиків 6, 7 (рис. 3).

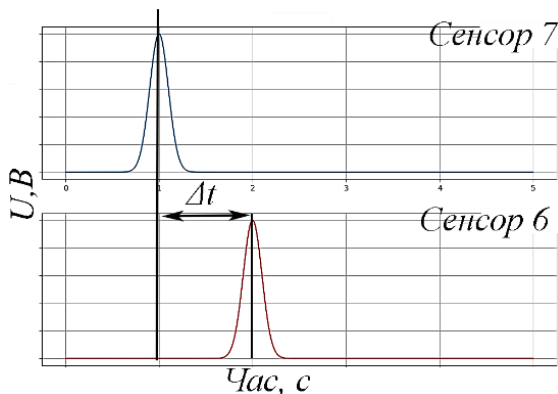


Рис. 3. Зсув між імпульсами сенсорів 6 та 7

Проміжок часу Δt може бути визначено наступним виразом:

$$\Delta t = \frac{dl}{V_{об}}, \tag{6}$$

де dl – елемент довжини окружності радіуса обертового диска R_d , що визначається кутом скручування пружного елемента розміщеного в розріз валу; $V_{об} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_d}{T} = \omega \cdot R_d$, T – період обертання вала двигуна; ω – кутова швидкість обертання.

Кут скручування динамометричної пружини на валу, може бути представлено, як добуток між обертовим моментом та коефіцієнтом, залежним від dl . Таким чином, отримаємо обертовий момент:

$$\begin{aligned} M &= \frac{dl}{K_1} = \frac{\Delta t \cdot V_{об}}{K_1} = \\ &= \frac{\Delta t \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_d}{K_1 \cdot T} = \frac{\Delta t}{T} \cdot K_2, \end{aligned} \tag{7}$$

де $K_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_d}{K_1}$ коефіцієнт пропорційності.

Отже, визначення обертового моменту базується на вимірах інтервалів часу Δt та періоду T обертання вала, де константа K_2 встановлюється під час калібрування за допомогою точних метрологічних інструментів. Для цього, динамометрична пружина повинна мати високу лінійність і адекватний динамічний діапазон.

Вимірювання кутової швидкості та кутового прискорення здійснюється також частотними методами.

Обробка даних та застосування нейронної мережі типу Autoencoder [8] для визначення аномальних відхилень в роботі асинхронного електродвигуна

З метою апробації запропонованої системи, що базується на вказаних методах вимірювання обертових параметрів електродвигуна, використано прототип вимірювального стенду для вимірювання параметрів асинхронно електродвигуна (рис. 4).



Рис. 4. Прототип вимірювального стенду

Калібрування датчиків моменту було здійснено вагово-плечовим методом з використанням спеціального плеча, яке закріплюється до валу шляхом створення електромагнітної фіксації. Це дозволяє визначити момент за при заданій швидкості обертання вала.

Ініційовано вибірку даних отриманих з вимірювальних сенсорів, які були інтегровані до обчислювального модуля 8 (рис. 2). Отримано перехідні характеристики в момент розгону електродвигуна до

швидкості 1200 об/хв представлено на рис. 5.

Отримані дані було завантажено в єдиний датасет, готовий до обробки. Було здійснено тренування моделі на частині датасету з відомими аномаліями отримані електродвигунів аналогічного типу [9].

Для тестування точності моделі у виявленні аномалій, ми використали окрему частину зібраних даних, яка не брала

участі у процесі тренування моделі. Цей підхід дозволяє об'єктивно оцінити здатність моделі реалізувати навчання на нових, раніше невідомих їй даних, імітуючи реальні умови використання.

В результаті під час вимірювання обертального моменту в умовах шумоподібного сигналу та при різних навантаженнях на вал, було визначено окремі аномалії (рис. 6).

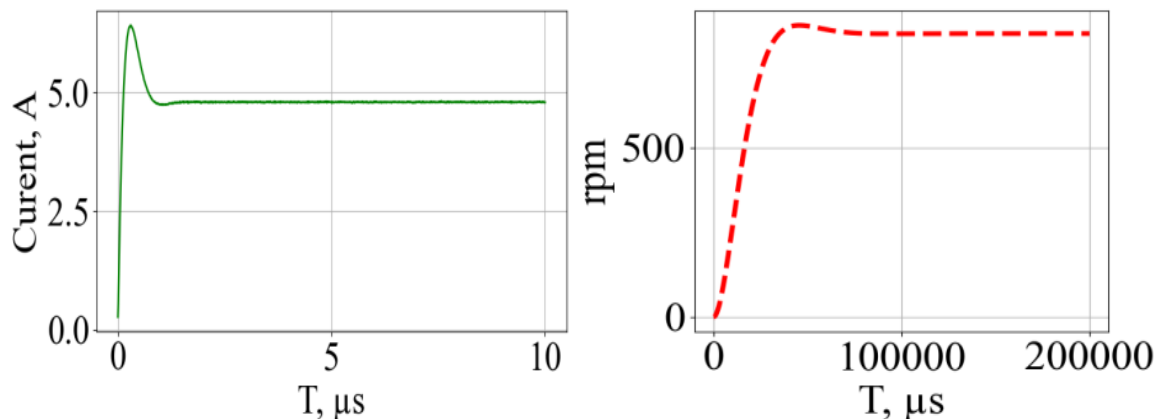


Рис. 5. Електро-механічні параметри асинхронного електродвигуна під час розгону до швидкості 1200 об/хв.

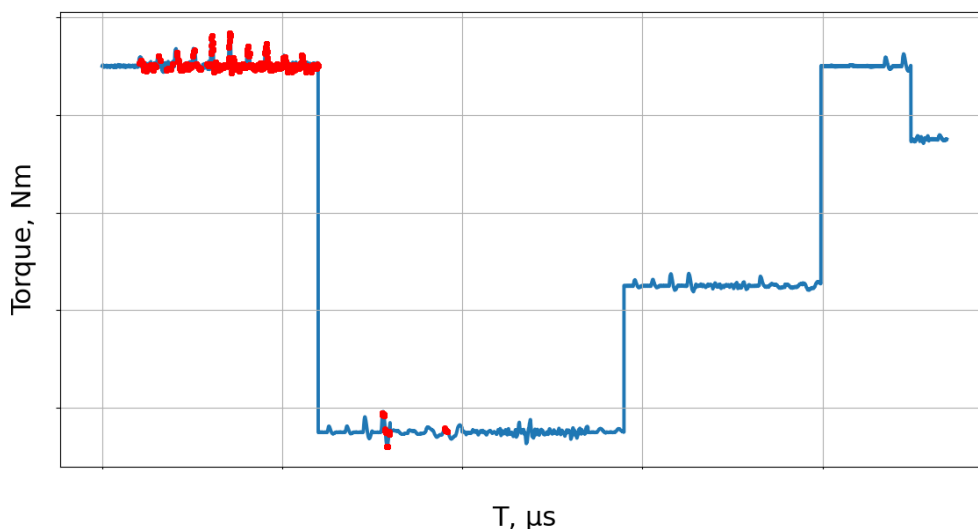


Рис. 6. Визначення аномалій під час вимірювання обертального моменту асинхронного електродвигуна

Так, в момент запуску можна спостерігати збільшення вібрації та в момент переходу до стабілізованого режиму. Це можна пояснити збільшення імпульсних відхилень, що викликано різкими змінами навантаження на вал.

Висновок

Експеримент показав, що використана модель нейронної мережі ефективно виявляє аномалії в роботі електродвигуна, зокрема при зміні навантажень та в умовах шуму. Збільшення вібрації при запуску та перехід до стабілізованого режиму вказує на здатність моделі розпізнавати

імпульсні відхилення, спричинені різкими змінами навантаження.

Запропонований метод вимірювання обертового моменту, який ґрунтується на вимірюваннях імпульсних характеристик двох сенсорів розміщених на валу з вмонтованою динамометричною пружиною показав високу лінійність при використанні його на швидкості обертання валу до 1200 об/хв.

Так, експериментальні результати вказують на те, що використання запропонованої системи вимірювання, забезпечує детекцію аномалій у складних умовах, таких як зміна навантажень або наявність шуму. Це свідчить про можливість її використання для підвищення надійності роботи електродвигунів та продовження терміну їх служби.

Література

1. Basseville M., Benveniste A., Moustakides G. Detection and Diagnosis of Abrupt Changes in Modal Characteristics of Nonstationary Digital Signals. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1986. Vol. 32. P. 412–417. DOI: 10.1109/TIT.1986.1057180.

2. Авраменко В. В., Шелехов І. В., Зарецький М. О. Швидке розпізнавання опорного сигналу під час його спорювання нелінійними об'єктами з експоненціальною статичною характеристикою. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. Вип. 1. С. 50–55. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-1-6.

3. Авраменко В. В. Характеристики непропорційності та їх застосування

при вирішенні задач діагностики. *Вестник СумГУ*. 2000. № 16. С. 27–32.

4. Ronny Francis Ribeiro Junior et al. Fault detection and diagnosis in electric motors using 1d convolutional neural networks with multi-channel vibration signals. *Measurement*. 2022. Vol. 190. 110759. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110759.

5. Jose Ignacio Aizpurua et al. Integrated machine learning and probabilistic degradation approach for vessel electric motor prognostics. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 275. 114153. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114153.

6. Спосіб вимірювання обертового моменту електродвигуна з використанням штучних нейронних мереж : пат. 155313 Україна : G01L 5/00. № u 2023 03538 ; заявл. 21.07.2023 ; опубл. 14.02.2024, Бюл. № 7. 5 с.

7. Інтелектуальний вимірювальний пристрій для визначення обертового моменту, частоти обертання, прискорення, напруги та струму електродвигуна : пат. 155312 Україна : G01B 7/004 (2006.01). № u 2023 03537 ; заявл. 21.07.2023 ; опубл. 14.02.2024, Бюл. № 7. 5 с.

8. Shuang Gao et al. Unsupervised fault diagnosis framework for underwater thruster system using estimated torques and multi-head convolutional autoencoder. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 205. 110814. DOI: 10.1016/j.ymsp.2023.11081.

9. Kaggle. Data Science. URL: <https://www.kaggle.com/> (date of access: 29.03.24).

Квасніков В.П., Квашук Д.М., Молчанова К.В., Ільченко В.М.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Стаття присвячена розробці інформаційно-вимірювальної системи для виявлення аномалій у роботі електродвигунів, що інтегрує методи вимірювання обертового моменту та швидкості валу. Основна увага у роботі приділена використанню нейронної мережі типу Autoencoder, яка використовується для ідентифікації аномальних сигналів в умовах шуму та при різних навантаженнях на вал електродвигуна.

Представлено експериментальні дослідження з використанням даного підходу підходу, демонструючи його здатність виявляти відхилення, спричинені різкими змінами

навантаження, а також ідентифікувати аномалії в різних режимах роботи електродвигуна. Така система сприяє підвищенню надійності електродвигунів та відкриває шлях до оптимізації процесів їх експлуатації.

Представлено методологію вимірювань обертального моменту, яка використовується при отриманні характеристик в моменту розгону електродвигуна.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки діагностичного обладнання для електродвигунів.

Ключові слова: вимірювання; вимірювальна система; нейронна мережа; дестабілізуючі фактори; обертальний момент; електродвигун; шумоподібний сигнал.

Kvasnikov V.P., Kvashuk D.M., Molchanova K.V., Pchenko V.M.

INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR DIAGNOSTIC PARAMETERS OF ELECTRIC MOTORS UNDER CONDITIONS OF DESTABILIZING FACTORS

The article is devoted to the development of an information and measurement system for detecting anomalies in the operation of electric motors, which integrates the methods of measuring the rotational moment and shaft speed. The main focus of the work is on the use of a neural network of the Autoencoder type, which is used to identify anomalous signals in noise conditions and under different loads on the electric motor shaft.

Experimental studies using this approach are presented, demonstrating its ability to detect deviations caused by sudden changes in load, as well as to identify anomalies in different modes of electric motor operation. Such a system contributes to increasing the reliability of electric motors and opens the way to optimizing the processes of their operation.

The methodology of measuring the torque, which was used when obtaining the characteristics at the time of acceleration of the electric motor, is presented.

The research results can be used to develop diagnostic equipment for electric motors.

Keywords: measurement; measurement system; neural network; destabilizing factors; torque; electric motor; noisy signal.