

УДК 621.313.13.016.08

doi: 10.32620/akt.2021.4sup.2.14

В. П. КВАСНІКОВ, Д. М. КВАШУК, М. О. КАТАЄВА

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Проблеми точного вимірювання зусиль переданих обертовим валам електродвигунів, вирішуються вже не одне століття. Разом з тим вони не втратили своєї актуальності і по сьогоднішній день, яка обумовлена широким розвитком і різноманітністю електричних двигунів та силових установок, специфічні умови роботи яких вимагають застосування широкого арсеналу вимірювальних засобів.

Важливим аспектом при застосуванні високоточних електродвигунів в таких сферах, як медицина, автотранспорт, ВПК є удосконалення метрологічних характеристик вимірювальної техніки. В таких умовах, особливого значення набуває вимірювання потужності на високошвидкісних установках, де в ряді випадків звичайні системи вимірювання або непридатні, або мають невисоку точність. Разом з тим, за відсутності засобів точного встановлення похибки, здійснюються спроби їх прогнозування, що дозволяє виявляти вплив малопомітних факторів на економічність силових установок. Навіть за нормальних умов функціонування вимірювальних приладів, через вплив ряду факторів, можуть з'являтися грубі похибки. Такі похибки непередбачувані, а їх значення складно прогнозувати. Для попередження впливу негативних факторів на роботу вимірювальних приладів, часто застосовують додаткові сенсори, наприклад для ідентифікації зайвих вібрацій, паралельно із тензометричними сенсорами застосовують віброметри.

За відсутності таких додаткових вимірювальних датчиків, з метою виявлення грубих похибок під час діагностики характеристик моменту сили доцільно застосовувати засоби машинного навчання, методики факторного аналізу, та імітаційне моделювання, або інші засоби прогнозування. За допомогою таких методів, серед вибірки даних отриманих від тензометричних, або інших сенсорів для вимірювання моменту сили, існує можливість ідентифікувати відхилення від нормальної роботи, через певні частотні закономірності таких впливів.

Серед багатьох праць, які описують характеристики похибок при вимірюванні фізичних величин, існує не багато таких, що присвячені прогнозуванню точності вимірювальних сенсорів. Таким чином, під час зміни вимірюваних умов виникають грубі похибки, які зводять на нівець процес управління електродвигунами, що часто є причиною аварійного стану.

Для вирішення цієї проблеми, потрібні прості та доступні засоби, які дозволять сформувати класифікацію відхилень похибок при вимірюванні. Проте враховуючи значну кількість факторів впливу на вимірювальне середовище, це можна реалізувати лише за умови індивідуального підходу до побудови вимірювальних приладів. З цією метою було розроблено стенд для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів. Проведено його тестування у умовах підвищеної вібрації. Результати таких тестувань дозволили зробити висновок про відсоток відхилення від номінального значення похибки тензометричного сенсору. А також виділити ряд особливостей такого відхилення, що викликані частотними характеристиками джерела імпульсів.

Представлено структуру програмно-технічних характеристик запропонованого стенду та його порівняння із вже існуючими аналогами. Висвітлено функціональну та електричну схему вимірювального стенду.

В результаті апробації запропонованого стенду було розроблено класифікацію факторів впливу на точність тензометричних сенсорів.

**Ключові слова:** метрологічний стенд; вимірювальна техніка; характеристики сигналу; електродвигуни; обертальний момент; швидкість обертання.

### Вступ

На сьогоднішній день точність вимірювань метрологічних характеристик електродвигунів відіграє ключову роль при визначенні їх придатності, не залежно від сфери застосування. Найважливішими із таких характеристик є швидкість обертання, потуж-

ність та обертальний момент електродвигуна.

В даний час держава приділяє значну увагу для розробки та вдосконалення метрологічних засобів для вимірювання цих параметрів. Проте існують потреби в оцінюванні факторів впливу на стабільну роботу сенсорів, які перетворюють фізичні величини в електричний сигнал, оскільки вони, в процесі

експлуатації можуть змінювати свої фізичні властивості. Це обумовлено не лише зовнішніми факторами впливу на стабільну роботу вимірювального приладу, а й термінами його експлуатації, частотою повірок стабільністю живлення, тощо.

Вимірювання швидкості обертання з урахуванням потужності та обертового моменту є одним з найбільш затребуваних типів вимірювання для електродвигунів. Для комплексного вимірювання цих величин, в промислових масштабах застосовується широке коло сенсорів [1]. У деяких випадках визначення обертового моменту, а відповідно і потужності електродвигуна, здійснюється опосередкованими методами, проте вони не дозволяють з високим ступенем достовірності визначити потрібну потужність та момент сили.

Точне вимірювання обертового моменту здійснюють за допомогою систем, що визначають обертову деформацію вала, однак такі системи мають певну складність. Одним із поширених методів точного вимірювання деформації вала є використання тензометричного моста (рис. 1) [2]. В такому випадку на вал наклеюються тензометри опору під кутом  $45^\circ$  до осі обертання, які з'єднані по мостовій схемі. Такі схеми мають високу чутливість, покращують лінійність одержуваної характеристики та значно зменшують вплив температури на величину вихідного сигналу.

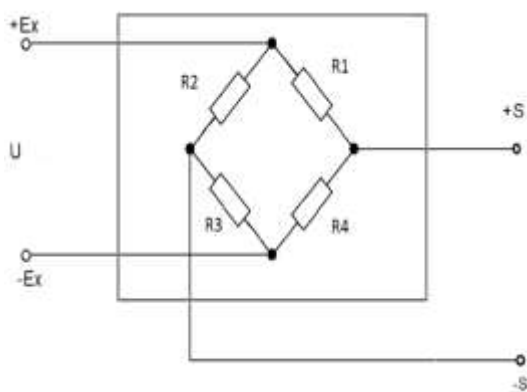


Рис. 1. Мостова схема тензометричного сенсору

На рис. 1 представлено:  $+Ex$ ,  $-Ex$  - вхідну напругу;  $+S$ ,  $-S$  - вихідний сигнал та  $R1-R4$  - тензометричні резистори, які змінюють свій опір в залежності від деформації. Застосування цієї схеми збільшує чутливість, покращує лінійність одержуваних характеристик та зменшує вплив температури на величину вихідного сигналу. Перевагою такого моста є те, що з його допомогою вимірюється тільки зміна, а не загальний опір.

Складність застосування вимірювальних пристроїв на основі таких компонентів полягає в передачі даних від чутливих елементів з обертового вала

споживачеві. Особливо це актуально під час вимірювання моменту інерції, оскільки слід враховувати ряд додаткових параметрів, зокрема гальмівні сили, ковзання, та обмежений діапазон кутової швидкості електродвигуна. Детально описано процес вимірювання таких параметрів у наступному посібнику [3]. Для вимірювання додаткових параметрів використовують індукційні, світлотехнічні, контактні та інші пристрої. На сьогоднішній день, в основному застосовують безпроводну передачу даних. Як правило такі засоби встановлюються безпосередньо на обертовому валу разом з елементом живлення.

Швидкість обертів вимірюється частотними сенсорами, які дозволяють встановити частоту обертання вала електродвигуна. Вони лежать в основі принципів роботи багатьох тахометрів.

Проблема застосування оптимальних підходів для вимірювання обертового моменту при різних швидкостях та потужностях електродвигунів в різних умовах має різні варіанти вирішення. Разом з тим, на практиці досить часто створюють індивідуальні метрологічні стенди для того, щоб експериментальним шляхом отримати характеристики надійності вимірювальних сенсорів.

Метою даної роботи є розробка стенду для вимірювання обертового моменту та швидкості та потужності електродвигунів.

## 1. Постановка задачі

Паралельне вимірювання обертового моменту швидкості та потужності електродвигуна потребує комплексного підходу до вибору сенсорів. Для цього має бути встановлений сенсор для вимірювання моменту сили та логічний елемент для отримання частотної характеристики обертання вала електродвигуна. Такими було вибрано тензометричний сенсор (рис. 2) та фото-транзистор, що змінює свій логічний стан в залежності від потрапляння на нього світла, яке випромінює світло-діод (рис. 3).

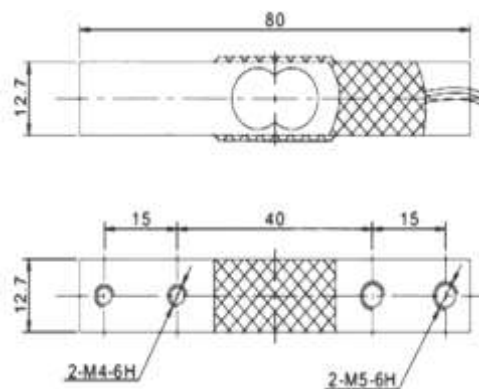


Рис. 2. Тензометричний сенсор

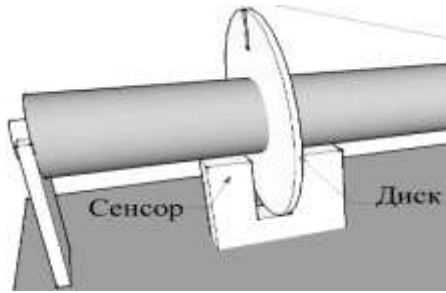


Рис. 3. Принцип вимірювання швидкості обертання електродвигуна

Перетворення сигналу від тензометричного сенсору можна реалізувати з використанням інтегральної мікросхеми HX711, яка є аналого-цифровим перетворювач з частотою дискретизації 24 біти та вбудованим малощумливим операційним підсилювачем. До складу мікросхеми входить інтегральний стабілізатор напруги, що виключає необхідність застосування зовнішнього стабілізатора. На вхід синхронізації може бути поданий будь-який імпульсний сигнал від зовнішнього джерела. Разом з тим АЦП допускає роботу від вбудованого генератора [4]. Таким чином отриманий цифровий сигнал можна відфільтрувати з використанням мікроконтролера, який буде використаний для обробки даних.

Принцип вимірювання обертового моменту сили, який передається валом електродвигуна можна отримати за допомогою спеціальної муфти, яка приєднана до плеча. В такому випадку обертальний момент буде дорівнювати векторному добутку:

$$\vec{M} = \vec{F} * \vec{R} = F * R * \sin \alpha, \quad (1)$$

де  $\vec{M}$  – момент сили;  $\vec{F}$  – сила (Н\*м);  $\vec{R}$  – плече сили;  $\alpha$  – кут між вектором сили  $\vec{F}$  та вектором плеча сили  $\vec{R}$ . Реалізацію вимірювання з використанням плеча та муфти, яка регулює силу взаємодії із валом електродвигуна та самим плечем, яке під час обертання валу тисне на тензометричний сенсор можна побудувати наступним чином (рис. 4).

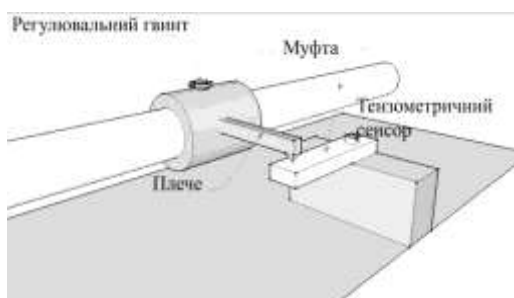


Рис. 4. Принцип вимірювання обертового моменту електродвигуна

Ідея візуалізації та зберігання таких даних може бути побудована на базі платформи Node MCU, в основі роботи якої лежить мікроконтролер ESP8266. Даний мікроконтролер має у своєму складі WIFI модуль, що дозволить передати дані до спеціального програмного додатку, де буде здійснено їх візуалізацію та зберігання [5].

Таким чином, враховуючи виробничі потреби у тестуванні вимірювальних сенсорів та приладів для вимірювання характеристик електродвигунів, простий та дешевий метрологічний стенд потребує подальшої реалізації та тестування.

## 2. Розробка метрологічного стенду

Основні характеристики стенду представлені на його функціональній схемі (рис. 5).

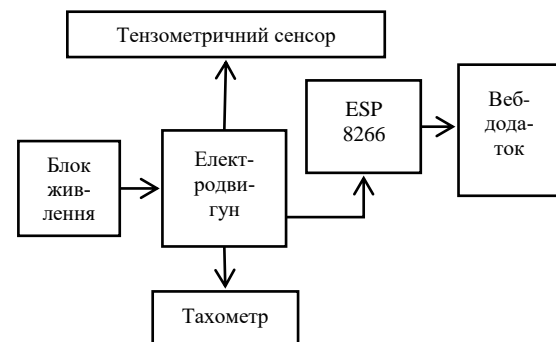


Рис. 5. Функціональна схема стенду для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів

У відповідності до функціональної схеми розроблено електричну схему (рис. 6)

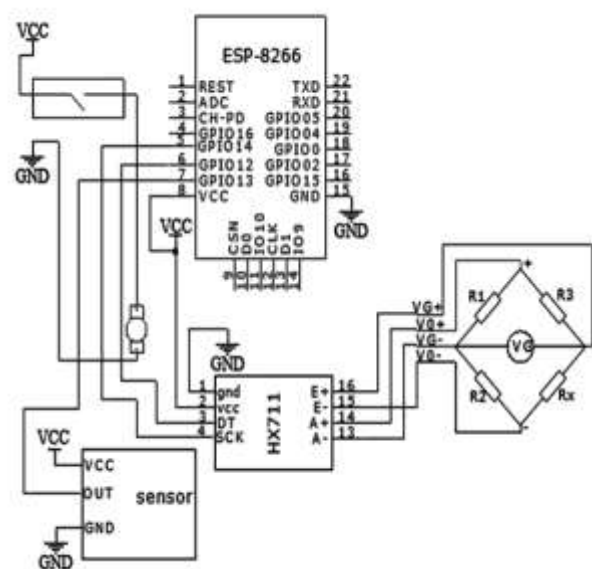


Рис. 6. Електрична схема стенду для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів

Для калібрування сенсорів та отримання даних, використано середовище для програмування мікроконтролерів Arduino IDE [6]. Код програми для калібрування представлено наступним чином:

```
#include <HX711.h> // імпорт програмної бібліотеки
// для роботи з АЦП [7]
HX711 sc; // створення об'єкта для роботи з бібліо-
// текою
float calibration = -5.3; /* створюється змінна, що
// містить у собі коефіцієнт
// для калібрування (для кожного
// сенсору окремо) */

float un;
float oun;
void setup() {
  Serial.begin(9600); // встановлення швидкості пере-
// дачі даних
  Serial.println("Розпочати калібрування");
  Serial.println("Зняти показники з сенсору");
  Serial.println("+ для збільшення калібрувального кое-
// фіцієнта");
  Serial.println("- для зменшення калібрувального кое-
// фіцієнта");
  scale.begin(3, 2); // призначення каналів передачі да-
// них
  scale.set_scale(); // призначення каналів передачі да-
// них
  scale.tare(); //обнуління показників
  long zero_factor = scale.read_average(); //отримати
// показник
  Serial.println(zero_factor);
}
void loop() {
  scale.set_scale(calibration); //коефіцієнт калібрування
// який потрібно застосувати
  Serial.print("Bara: ");
  un = scale.get_un(), 10;
  if (un < 0)
  {
    un = 0.00;
  }
  oun = un * 0.035274;
  Serial.print(oun);
  Serial.print(" грам");
  Serial.print("Калібрувальний коефіцієнт ");
  Serial.print(calibration);
  if(Serial.available())
  {
    char temp = Serial.read();
    if(temp == '+' || temp == 'a')
      calibration += 1;
    else if(temp == '-' || temp == 'z')
      calibration -= 1;
  }
}
```

Таким чином, калібрування відбувається в два етапи:

1. На валу створюються розтягуючі зусилля. Величина зусиль з лінійного тензомоста заноситься в контролер. За отриманими значеннями, в програмний код вноситься поправка.

2. На валу створюється крутний момент. Після чого відбувається зчитування та фіксація кодів АЦП приходить. У відповідності до першого способу, будується лінійна залежність коефіцієнта калібрування:

$$k = \frac{M}{m - \Delta m(l)}, \quad (2)$$

де  $M$  – значення заданого моменту сили;  $m$  – показники кодів від тензомоста;  $\Delta m(l)$  – поправочна величина моменту сили, яка визначається по калібрувальним даним тензомоста.

В іншому випадку будується нелінійна залежність, з використанням апроксимації експериментальних значень методом найменших квадратів. Залежність обертового моменту від калібрувальних коефіцієнтів  $A_0$ ,  $A_1$  визначається поліномом першого ступеня:

$$M = A_0 + A_1(\Delta m(l)). \quad (3)$$

Отже, задача полягає в тому, щоб визначити такі значення коефіцієнтів  $A_0$ ,  $A_1$ , при яких крива якомога ближче проходила б до усіх  $n$  точок визначених при калібруванні  $(M_1, m_1)$ ,  $(M_2, m_2)$ , .....  $(M_n, m_n)$ . Але, в даному випадку не можливо знайти криву, котра проходила б через усі задані точки. Крім того, жодна із розглянутих точок не задовольняє точного рівняння. Якщо підставити в таке рівняння координати таких точок, то отримаємо наступну систему:

$$\begin{cases} A_0 + A_1 m_1 - M_1 = q_1 \\ A_0 + A_1 m_2 - M_2 = q_2 \\ \dots\dots\dots \\ A_0 + A_1 m_n - M_n = q_n \end{cases}, \quad (4)$$

де:  $q_1, q_2, q_n$  – величини похибок. Разом з тим не можна знайти таку криву, яка б проходила через усі задані точки. Тому, відповідно до принципу найменших квадратів найкращі значення коефіцієнтів  $A_0$ ,  $A_1$  будуть такі, для яких сума квадратів похибок

буде найменшим, тобто значення  $\sum_{k=1}^n q_k^2$ , буде міні-

мальним. Таким чином, величина, яка розглядається, як функція коефіцієнтів  $A_0$ ,  $A_1$  повинна мати мінімум:

$$\sum_{k=1}^n (A_0 + A_1 m_k - M_k)^2 = F(A_0, A_1). \quad (5)$$

Тому для калібрування тензометричного сенсору було застосовано метод підстановок. Відкалібрувавши тензометричний сенсор, з допомогою еталонних ваг, його похибка склала 1...1.5 % в межах 5 кг.

Аналогічна процедура була проведена із калібруванням тахометру. В якості еталону був використаний контактний тахометр Venetech GM8906, клас точності якого складає  $\pm(0.05 \% + 1)$  об/хв.

Програмний код для вимірювання швидкості обертання валу електродвигуна має наступний вигляд:

```
int speed;
if(DigitalRead(pin)==1){ // фото - транзистор відкрився під променем світла
    if(strLine<millis()){ // якщо рахунковий регістр millis(), збільшився на певну кількість одиниць
        speed = (60000/(millis()-strLine)); // значення швидкості обертання записується у змінну speed
    } strLine = millis(); // змінній присвоюється поточне значення рахункового регістру millis();
    while(DigitalRead(pin)!=1){ // відбувається очікування, поки через отвір диску (див. рис.3) до фото-транзистора потрапляє промінь світла.
```

Таким чином на основі вищевказаних характеристик було побудовано метрологічний стенд (рис. 7).

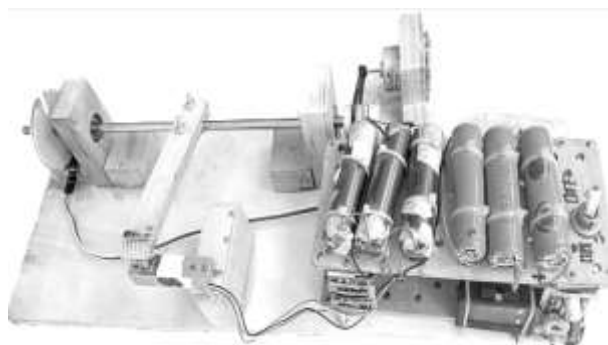


Рис. 7. Стенд для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів

Отримані дані, від мікроконтролера, який має у своєму складі WIFI модуль передаються по протоколу http до веб-додатку, який реалізовано на базі фреймворку flask. Графіки для візуалізації швидкості обертання, потужності та моменту сили реалізовано з використанням програмної бібліотеки plotly.js [8]. Веб - інтерфейс такого додатку має наступний вигляд [9] (рис. 8).

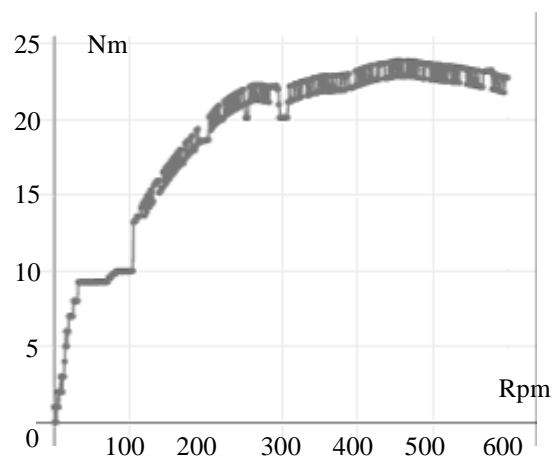


Рис. 8. WEB - інтерфейс додатку для збору інформації про вимірювання метрологічного стенду

### 3. Тестування стенду

Для тестування було вибрано електродвигун постійного струму. Напруга: 12 В; струм: – 0.7 А; частота обертання 1000 об/хв.

В результаті отримано перехідну характеристику залежності обертального моменту від швидкості протягом 10 секунд роботи електродвигуна (рис. 9).

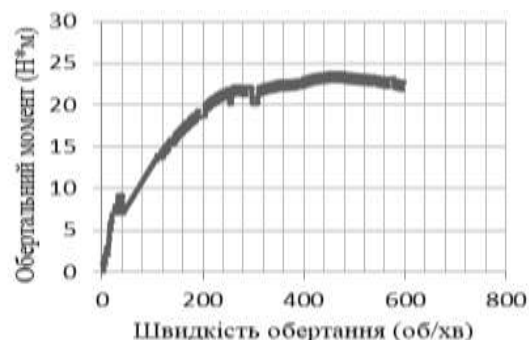


Рис. 9. Перехідна характеристика залежності обертального моменту від швидкості електродвигуна

Із кривої видно додаткові шуми, які пов'язані із вібрацією викликаною нерівномірним тертям між поверхнею валу електродвигуна та регулювальною муфтою, що представлені на рис. 4. Також спостерігаються різкі падіння обертів, що також можна пояснити впливом вібрації та нерівномірним тертям між поверхнями рухомих елементів.

### Висновок

Попри широкі можливості для побудови стендів для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів, складність полягає у їх калібруванні та зменшенні похибки вимірювальних сенсорів.

Застосування тензометричного сенсору в конструкції розробленого стенду дозволило отримати клас точності при вимірювання обертового моменту  $\pm 1.5...2\%$ . Його калібрування відбувалось із використанням вагових еталонних гир, методом підстановки потрібного коефіцієнту.

Під час вимірювання швидкості обертання валу електродвигуна калібрування відбувалось з використанням тахометру Venetech GM8906, який має клас точності  $\pm(0.05\% + 1)$  об/хв. Також методом підстановок був відкалібрований поправочний коефіцієнт, що в результаті дозволило отримати клас точності  $1...2\%$ .

Запропонований стенд потребує подальшого вдосконалення, зокрема в контексті зменшення похибок та розширення спектру вимірювання фізичних величин (струм, напруга та температура електродвигуна).

## Література

1. Гапонов, В. Л. Измерение крутящего момента на вращающихся валах [Текст] / В. Л. Гапонов, А. С. Гуринов, В. В. Дудник // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – № 1-2 (62). – С. 25-32.
2. Метрологія та вимірювальна техніка [Текст]: навчальний посібник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.
3. Костиков, К. Тензометрические датчики силы [Текст] / К. Костиков, Й. Чукач // Компоненты и технологии. – 2010. – № 102. – С. 16-18.
4. Тензодатчики и HX711. Руководство пользователя [Электронный ресурс. – Режим доступа: [https://wiki.arduino.ru/page/hx\\_711\\_with\\_tenzo](https://wiki.arduino.ru/page/hx_711_with_tenzo). – 11.02.2021.
5. Шварц, М. Интернет вещей с ESP8266 [Текст] / Марко Шварц. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 224 с.
6. Enrique, Ramos Melgar. *Arduino and Kinect Projects. Design, Build, Blow Their Minds [Text] / Ramos Melgar Enrique, Castro Díez Ciriaco and Jaworski Przemek. – Apress, Inc., 2012. – 385 p.*
7. *An Arduino library to interface the Avia Semiconductor HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weight Scales [Electronics source]: according to the GitHub repository 2021. – Access mode: <https://github.com/bogde/HX711#readme>– 11.02.2021.*
8. Роббинс, Дженнифер. *HTML5, CSS3 и JavaScript. Исчерпывающее руководство [Текст] / Дженнифер Роббинс. – М.: Эксмо, 2017. – 528 с.*
9. Кващук, Д. *WEB-додаток для обробки даних метрологічних характеристик вимірювального стенду [Електронний ресурс] / Д. Кващук. – Режим доступу: <http://dmitro.pythonanywhere.com/torque>. – 11.02.2021.*

## References

1. Gaponov, V. L., Gurinov, A. S. Dudnik, V. V. Izmereniye krutyashchego momenta na vraschayushchikhsya valakh, [Measurement of torque on rotating shafts]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta – Bulletin of the Don State Technical University*, 2012, no. 1-2 (62), pp. 25-32.
2. Kukharchuk, V. V., Kucheruk, V. Yu., Dolhopolov, V. P., Hrumins'ka, L. V. *Metrolohiya ta vymiryuval'na tekhnika* [Metrology and measuring equipment]. Vinnytsia, UNIVERSUM-Vinnytsya Publ., 2004. 252 p.
3. Kostikov, K., Chukan, Y. *Tenzo-metricheskiye datchiki sily* [Tenzometric force sensors]. *Komponenty i Tekhno-logii – Components and technologies*, 2010, no. 102, pp. 32-43.
4. *Tenzodatchiki i NKH711. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Load cells and HX711. User's Guide]. Available at: [https://wiki.arduino.ru/page/hx\\_711\\_with\\_tenzo](https://wiki.arduino.ru/page/hx_711_with_tenzo) (accessed 11.02.2021).
5. Schwartz, M. *Internet veshchey s ESP8266* [Internet of Things with ESP8266]. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2019. 224 p.
6. Melgar, E. R. Díez, C. C. Jaworski, P. *Arduino and Kinect Projects. Design, Build, Blow Their Minds*. Berkeley, Apress Inc. Publ., 2012. 385 p.
7. *An Arduino library to interface the Avia Semiconductor HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weight Scales*. Materials from the website GitHub Inc. Available at: <https://github.com/bogde/HX711#readme> (accessed 11.02.2021).
8. Dzhennifer, R. *HTML5, CSS3 i JavaScript. Ischerpyvayushcheye rukovodstvo* [HTML5, CSS3 and JavaScript. The Comprehensive Guide]. Moscow, Eksmo Publ., 2017. 528 p.
9. Kvashuk, D. *WEB-dodatok dlya obrobky danykh metrolohichnykh kharakterystyk vymiryuval'noho stendu* [WEB-application for data processing of metrological characteristics of the measuring stand]. Available at: <http://dmitro.pythonanywhere.com/torque> (accessed 11.02.2021).

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*В. П. Квасников, Д. М. Квашук, М. А. Катаева*

Проблемы точного измерения усилий, переданных вращающимся валам электродвигателей, решаются уже не одно столетие. Вместе с тем, они не потеряли своей актуальности, которая обусловлена широким развитием и разнообразием электрических двигателей и силовых установок, специфические условия работы которых, требуют применения широкого арсенала средств измерений.

Важным аспектом в процессе применения высокоточных электродвигателей в таких сферах, как медицина, автотранспорт, ВПК, является совершенствование метрологических характеристик измерительной техники. В таких условиях, особое значение приобретает измерения мощности на высокоскоростных установках, где в ряде случаев обычные системы измерения или непригодны, или имеют невысокую точность.

Вместе с тем, при отсутствии средств точного определения погрешности, осуществляются попытки их прогнозирования, что позволяет определить влияние малозаметных факторов на экономичность силовых установок. Даже при оптимальных условиях функционирования измерительных приборов, из-за влияния ряда факторов, могут появляться грубые погрешности. Такие погрешности непредсказуемы, а их значение сложно прогнозировать. Для предупреждения воздействия негативных факторов на работу измерительных приборов, часто применяют дополнительные сенсоры, например, для идентификации лишних вибраций, параллельно с тензометрическими сенсорами применяют виброметры.

При отсутствии таких дополнительных измерительных датчиков, с целью выявления грубых ошибок при диагностике характеристик момента силы целесообразно применять средства машинного обучения, методики факторного анализа, имитационное моделирование, а также другие средства прогнозирования. С помощью таких методов, среди выборки данных полученных от тензометрических, или других сенсоров, для измерения момента силы, существует возможность идентифицировать отклонения от нормальной работы, через определенные частотные закономерности таких воздействий.

Среди многих работ, описывающих характеристики погрешностей при измерении физических величин, существует не много таких, которые посвящены прогнозированию точности измерительных сенсоров. Таким образом, при изменении измеряемых условий возникают грубые ошибки, которые сводят на нет процесс управления электродвигателями, что часто является причиной аварийного состояния.

Для решения этой проблемы, нужны простые и доступные средства, которые позволят сформировать классификацию отклонений погрешностей при измерении. Однако, учитывая значительное количество факторов влияния на измерительную среду, это можно реализовать только при условии индивидуального подхода к построению измерительных приборов. С этой целью был разработан стенд для измерения метрологических характеристик электродвигателей. Проведено его тестирование в условиях повышенной вибрации. Результаты таких тестирований позволили определить отклонения от номинального значения погрешности тензометрического сенсора. А также выделить ряд особенностей такого отклонения, вызванные частотными характеристиками источника импульсов. Представлено структуру программно-технических характеристик предлагаемого стенда и его сравнение с уже существующими аналогами, а также функциональную и электрическую схему.

В результате апробации предложенного стенда была разработана классификация факторов влияния на точность тензометрических датчиков.

**Ключевые слова:** метрологический стенд; измерительная техника; характеристики сигнала; электродвигатели; вращательный момент; скорость вращения.

## DEVELOPMENT OF A STAND FOR MEASURING METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MOTORS

*V. Kvasnikov, D. Kvashuk, M. Kataeva*

The problems of accurate measurement of the forces transmitted to the rotating shafts of electric motors have been solved for more than one century. At the same time, they have not lost their relevance, which is due to the wide development and variety of electric motors and power plants, the specific operating conditions of which require the use of a wide arsenal of measuring instruments.

An important aspect in the process of using high-precision electric motors in such areas as medicine, vehicles, military-industrial complex is the improvement of the metrological characteristics of measuring equipment. In such conditions, power measurements at high-speed installations, where in some cases conventional measurement systems are either unsuitable or have low accuracy, are of particular importance.

At the same time, in the absence of means of accurate determination of the error, attempts are made to predict them, which makes it possible to determine the influence of subtle factors on the efficiency of power plants. Even under optimal conditions for the functioning of measuring instruments, due to the influence of a number of factors,

gross errors may appear. Such errors are unpredictable, and their significance is difficult to predict. To prevent the impact of negative factors on the operation of measuring instruments, additional sensors are often used, for example, to identify unnecessary vibrations, vibrometers are used in parallel with strain gauges.

In the absence of such additional measuring sensors, in order to identify gross errors in diagnosing the characteristics of the moment of force, it is advisable to use machine learning tools, factor analysis techniques, simulation modeling, and other forecasting tools. With the help of such methods, among the sampling of data obtained from strain gauges, or other sensors, for measuring the moment of force, it is possible to identify deviations from normal operation, through certain frequency patterns of such influences.

Among the many works describing the characteristics of errors in measuring physical quantities, there are not many that are devoted to predicting the accuracy of measuring sensors. Thus, when the measured conditions change, gross errors occur that negate the process of controlling electric motors, which is often the cause of an emergency condition.

To solve this problem, you need simple and affordable tools that will allow you to form a classification of deviations in measurement errors. However, taking into account a significant number of factors of influence on the measuring medium, this can be realized only under the condition of an individual approach to the construction of measuring instruments. For this purpose, a stand was developed for measuring the metrological characteristics of electric motors. It was tested in conditions of increased vibration. The results of such tests made it possible to determine the deviations from the nominal error value of the strain gauge sensor. And also highlight a number of features of such a deviation caused by the frequency characteristics of the pulse source. The structure of the software and technical characteristics of the proposed stand and its comparison with existing analogs, as well as the functional and electrical circuit are presented.

As a result of testing the proposed stand, a classification of factors influencing the accuracy of strain gauges was developed.

**Keywords:** metrological stand; measuring equipment; signal characteristics; electric motors; torque; rotation speed.

**Квасніков Володимир Павлович** – д-р техн. наук, проф., заслужений метролог України, зав. каф. комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

**Квашук Дмитро Михайлович** – канд. економ. наук, доц., доц. каф. бізнес-аналітики та цифрової економіки, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

**Катаєва Марія Олександрівна** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

**Volodymyr Kvasnikov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Metrologist of Ukraine, Head of Department of Computerized Electrical Systems and Technologies, National Aviation University, Kiev, Ukraine, e-mail: kvp@nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6525-9721, Scopus Author ID: 56871189000, ResearcherID: AAD-7097-2021, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=FYyууyоААААJ>.

**Dmytro Kvashuk** – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Business Analytics and Digital Economy, National Aviation University, Kiev, Ukraine, e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4591-8881, Scopus Author ID: 57219115681, ResearcherID: T-7855-2018, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=T-gcwmEААААJ>.

**Mariia Kataieva** – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computerized Electrical Systems and Technologies, National Aviation University, Kiev, Ukraine, e-mail: mariia.kataieva@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1586-1861, Scopus Author ID: 57223102957, ResearcherID: H-2254-2019, <https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=NtqaCAYAAAАJ>.