

Квасніков В.П., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6525-9721,

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

Шелуха О.О., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6088-8262,

Любунь К.О.,
orcid.org/0000-0003-0388-2566

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ

Національний авіаційний університет

kvp@nau.edu.ua

dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua

oleksii.shelukha@npp.nau.edu.ua

131230@stud.nau.edu.ua

Вступ

Електродвигуни є найважливішим елементом багатьох промислових процесів. Вони споживають переважно більшість енергії та враховуючи їх роль у промисловості, вартість їх ремонту, що пов'язана із несправністю, може вимірюватися десятками тисяч доларів на годину. Тому, ризики пошкодження електродвигунів краще попереджувати, а ніж потім ліквідувати їх наслідки.

Так, забезпечення ефективної та надійної роботи електродвигунів – одне з найважливіших завдань, для фахівців з обслуговування промислового обладнання.

Враховуючи те, що електродвигуни споживають значну кількість енергії, ефективність їх використання стала основним фактором економічної ефективності роботи промислових підприємств.

Необхідність забезпечити економію підтримується промисловими стандартами, такими, як ISO 50001 [1], який встановлює основні положення та вимоги для підтримки систем управління енергоспоживанням.

Разом з тим, стандартизовані системи управління та контролю електричними двигунами, які побудовані на основі вимірювальних засобів, мають обмежену кількість інформаційних параметрів, які

можна отримати в процесі роботи електродвигуна. Як правило, такі системи є уніфікованими [2], основне призначення яких – отримувати основні метрологічні характеристики роботи електродвигуна. До таких можна віднести: напругу, струм, обертальний момент та швидкість обертання валу. Проте, для передбачення виходу із строю електродвигуна, можна розширити коло інформаційних параметрів. Наприклад додавши показники вібрації, температури, вологості, задимленості, тощо.

Разом з тим, необхідність точного вимірювання обертального моменту та швидкості обертання валу обумовлена не лише стабільністю роботи електродвигуна, а й технологічними потребами. Тому актуальним є дослідження розподілених інформаційних систем управління електродвигунами, з метою ведення контролю та прогнозування їх основних параметрів.

Мета

Метою є розробка інформаційної системи для вимірювання основних параметрів електродвигунів, зокрема обертального моменту, потужності, споживання струму та напруги. Вимогами до такої системи є: простота у використанні, можливість бути швидко переобладнаною під нові задачі, уніфікованість та доступність.

Основна частина

Запропонована інформаційна система для вимірювання обертового моменту електродвигунів побудована з використанням тензометричних сенсорів серії TS [3], аналогово-цифрового перетворювача (24 біт) HX711, який передає перетворений цифровий сигнал до мікроконтролеру ESP8266, що має у своєму складі WIFI модуль. Це дозволяє отримати доступ до локальної мережі та створює можливість

шляхом http запиту передавати показники ряду інформаційних параметрів до спеціально розробленого web – додатку, який візуалізує отримані дані та дозволяє надсилати відповіді на періодичні запити від ESP8266. Такі відповіді містять управляючі сигнали, що перетворюються на вихідні логічні сигнали мікроконтролеру ESP8266, а також сигнали ШИМ. Функціональна схема такої системи представлена на рис.1.

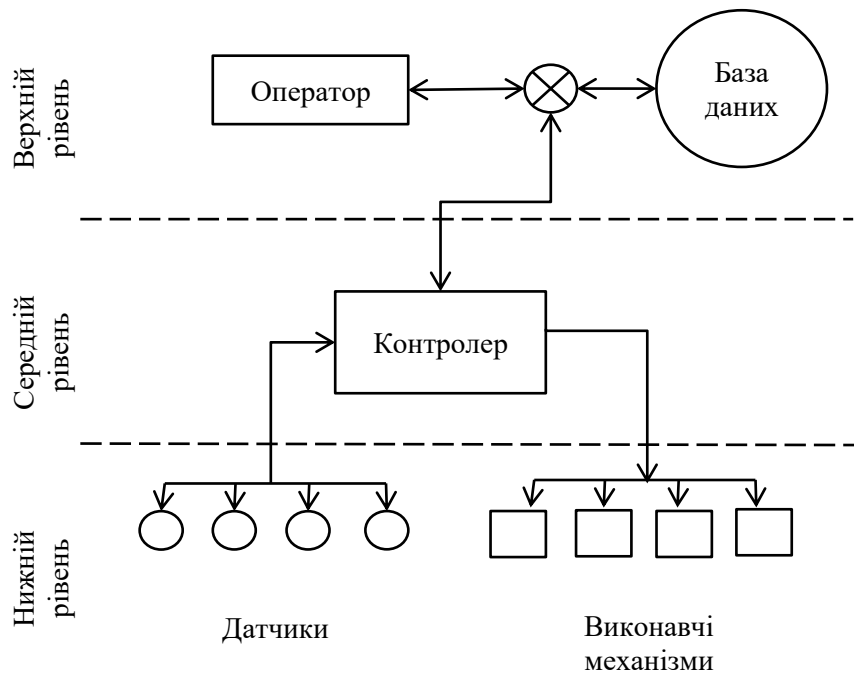


Рис. 1. Функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи роботи електродвигунів

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

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot \vec{R} = F \cdot R \cdot \sin a, \tag{1}$$

де: \vec{M} – момет сили; \vec{F} – сила (Нм); \vec{R} – плече сили; a – кут між вектором сили \vec{F} та вектором плеча сили \vec{R} .

Макет вимірювального пристрою з використанням плеча та муфти, яка регулює силу взаємодії із валом електродвигуна та самим плечем, що під час обер-

тання валу тисне на тензометричний сенсор побудовано з використанням тензометричного сенсору та АЦП (рис.2).

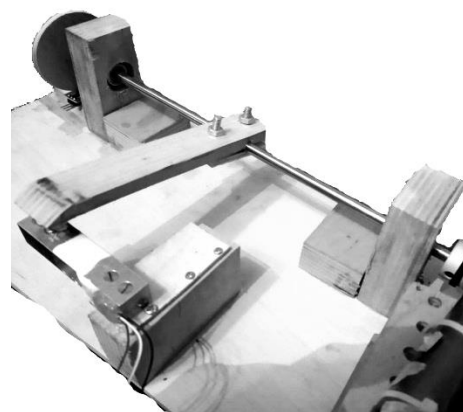


Рис. 2. Макет сенсору для вимірювання обертового моменту

Вимірювання швидкості обертання електродвигуна, реалізовано шляхом підрахунку імпульсів. Для цього застосовано датчик обертів FC-03, який має у своєму складі світлодіод, який спрямовує світло на фото – транзистор, що змінює свій логічний стан, передаючи його на вхід одного із портів мікроконтролера (рис.3).

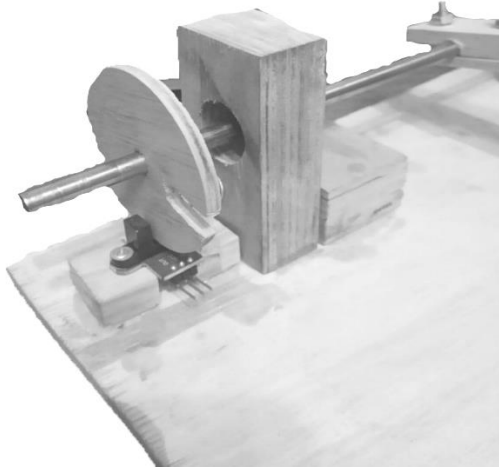


Рис. 3. Датчик обертів

Калібрування тензOMETричного сенсору, який використовує мікросхему HX711 відбувається в два етапи [4]:

1. створюються розтягуючі зусилля. Величина зусиль з тензOMETричного моста заноситься в контролер. Отримані значення вносяться в програмний код, який компілюється та записується в мікроконтролер.

2. на валу створюється обертальний момент. Після чого відбувається зчитування та фіксація кодів з АЦП. У першому випадку, буде створена 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 формується нелінійна залежність, з використанням апроксимації експериментальних значень методом найменших квадратів. Залежність обе-

ртового моменту від калібрувальних коефіцієнтів A_0, A_1 визначається поліномом першого ступеня:

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

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 $(M_1, m_1), (M_2, m_2), \dots, (M_n, m_n)$.

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 рівнянь:

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

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 найменшою, тобто значення $\sum_{k=1}^n q_k^2$, буде мінімальним.

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 тензOMETричного сенсору було застосовано метод підстановок. Відкалібрувавши тензOMETричний сенсор, з допомогою еталонних ваг, його похибка склала 1-1.5% в межах 5 кг.

Така ж процедура була проведена із калібруванням сенсору для вимірювання обертів.

Отриманий сигнал від HX711 у вигляді бінарного коду передається з використанням фізичного інтерфейсу UART до мікроконтролера ESP8266. Для роботи із мікросхемою HX711 використовується бібліотека HX711.h, яка міститься в середо-

вищі Arduino IDE. Для роботи із http протоколом також було використано ряд програмних бібліотек в цьому середовищі.

Серверна частина реалізована на базі серверного програмного забезпечення Nginx, який встановлено на віртуальному сервісі, який забезпечує можливість використовувати інтерпретатор Python, завдяки якому відбувається обробка даних.

Веб-інтерфейс реалізовано з використанням фреймворку CherryPy [5]. Для візуалізації даних застосовано JavaScript бібліотеку plotly.js [6].

Для тестування інформаційної системи, було використано розроблений метрологічний стенд, де встановлено електродвигун 12 В, 5 А. (рис.4). Функціональна схема тензометричного стенду представлена на рис.5.

Вимірювання струму було реалізовано з використанням модуля аналогового типу. Принцип вимірювання заснований на контролі напруги, що знімається з прецизійного дільника напруги. Для вимірювання використовується мікросхема MAX471 із вбудованим вимірювальним шунтом.

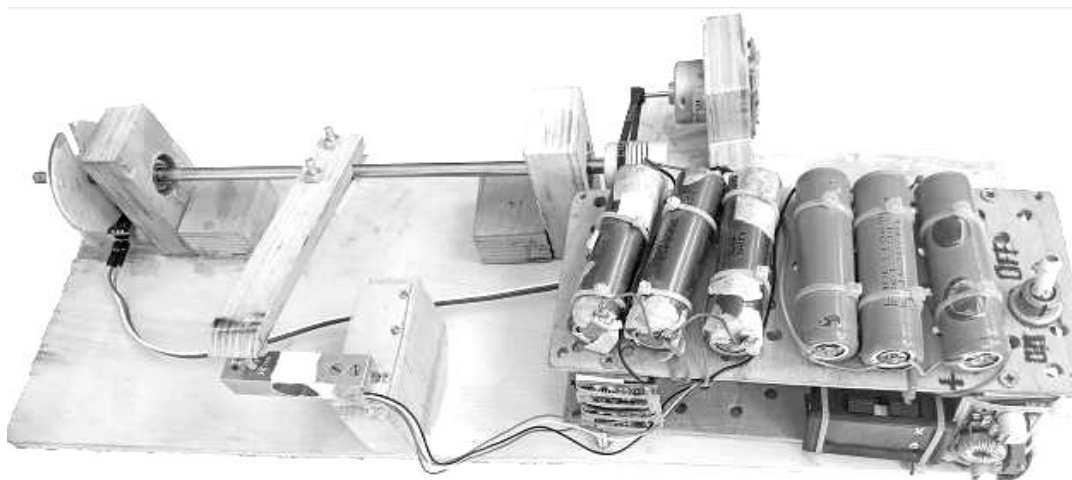


Рис. 4. Стенд для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів

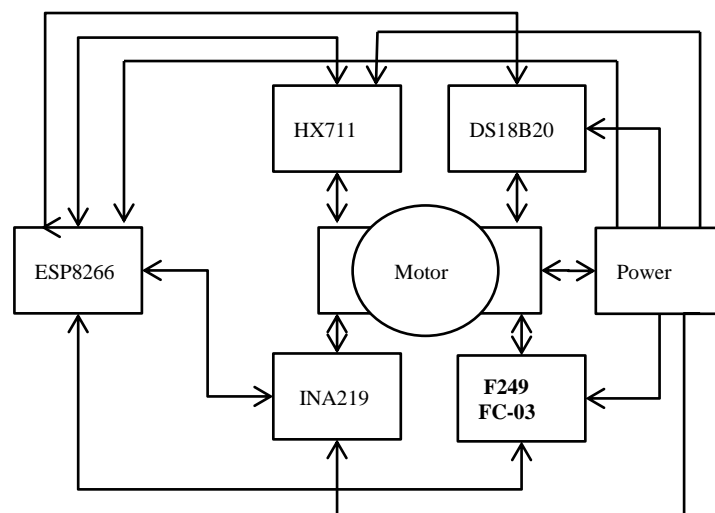
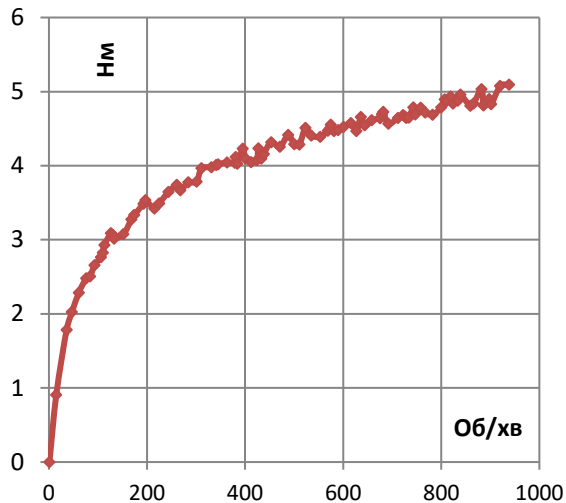


Рис. 5. Функціональна схема стенду для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів

Результати тестування вимірюваної системи представлено на рис.6, де видно, як в момент пуску, споживання струму є

максимальним, обертальний момент стабілізується на рівні 800 об/хв, а перехідна характеристика розгону складає 3 с.



А – Обертальний момент, (Нм)

Разом з тим перевірка на точність таких вимірювань показала значну похибку. Так, показники швидкості обертання мали похибку $\pm 2-3\%$ при обертанні валу до 1000 об/хв. Клас точності сенсору для вимірювання обертального моменту склав 3-4%, в діапазоні 2-5 Нм.

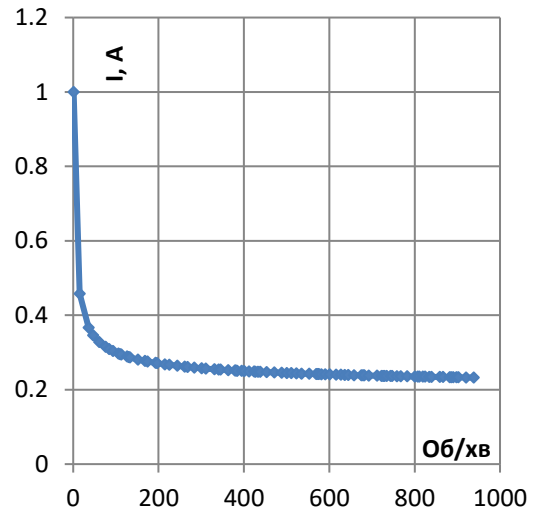
Висновок

Тестування запропонованої інформаційної системи для вимірювання основних інформаційних параметрів електродвигунів показало, що її можна використовувати не лише для вимірювання, а й для управління, що робить її універсальною в багатьох сферах.

Разом з тим, за результатами обробки сигналу, було отримано значну похибку обертального моменту та швидкості обертання валу електродвигуна, що потребує використання спеціалізованих обчислювальних пристроїв та використання більш точних сенсорів.

Література

1. ISO 50001:2011 Energy management systems – Requirements with guidance for use. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://webstore.ansi.org/>
2. Abdalhossein Rezai, Parviz Keshavarzi, Zahra Moravej. Key management issue in SCADA networks: A review. Engineering Science and Technology,



В – Струм

an International Journal. – 2017. – Vol. 20. – Iss. 1. – 3. 354-363.

3. Jiroutova, Dita, Vokáč, Miroslav. (2013). Analysis of the accuracy of fibre-optic strain gauges. Acta Polytechnica, 53. 10.14311/AP.2013.53.0872.

4. Гапонов В.Л. Измерение крутящего момента на вращающихся валах / В.Л. Гапонов, А.С. Гуринов, В.В. Дудник // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – №1-2 (62). – С. 25-32.

5. Enrique Ramos, Melgar Arduino, and Kinect Projects. Design, Build, Blow Their Minds / Ramos Melgar Enrique, Castro Díez Ciriaco and Jaworski Przemek - Apress, Inc. – 2012. – P. 385.

6. Qin, Rufu & bin, Feng & Xu, Zhounan & Zhou, Yusheng & Liu, Lixin & Li, Yineng. (2021). Web-based 3D visualization framework for time-varying and large-volume oceanic forecasting data using open-source technologies. Environmental Modelling & Software, 135. 104908. 10.1016/j.envsoft.2020.104908.

7. Квашук Д. WEB-інтерфейс комп'ютерної системи для вимірювання обертального моменту. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://dmitro.pythonanywhere.com/torque>.

Квасніков В.П., Квашук Д.М., Шелуха О.О., Любунь К.О.

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ

У статті представлено спосіб розробки інформаційної системи для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів. Для цього розроблено програмний додаток, який дозволяє візуалізувати отримані дані від мікроконтролера, який перетворює сигнал з первинних датчиків в уніфіковану строкову форму. Система може працювати, як в локальній мережі LAN так і з виходом до Інтернету WAN. Описується можливість інтеграції такої системи до загальних SCADA систем. Пояснюється призначення та принцип вимірювальних сенсорів. Висвітлюється програмний код, як самого WEB - додатку, так і програмний код, який був використаний для програмування мікроконтролера для перетворення сигналу первинних сенсорів. Представлено спосіб калібрування тензометричних сенсорів. Висвітлено функціональну схему первинного рівня для вимірювання обертальних моментів електродвигунів, а також вимірювання струму та напруги. Описано алгоритм роботи інформаційної системи. Проведено тестування даної системи на метрологічному стенді з використанням колекторного електродвигуна постійного струму. Однак її використання показало, що точність таких вимірювань має значну похибку, що пов'язано із використанням не промислового мікроконтролера та дешевих сенсорів. Проте, збільшивши клас точності вимірювальних засобів шляхом використання високоточних датчиків, інформаційну систему можна використовувати не лише для вимірювання, а й для управління, що робить її універсальною в багатьох сферах виробництва.

Ключові слова: інформаційна система, обертальний момент, електродвигуни, датчики, потужність, струм.

Kvasnikov V.P., Kvashuk D.M., Shelukha O.O., Liubun K.O.

COMPUTER TORQUE MEASUREMENT SYSTEM

The article presents a method of developing an information system for measuring the metrological characteristics of electric motors. To do this, a software add-on has been developed that allows you to visualize the data received from the microcontroller, which converts the signal from the primary sensors into a unified string form. The system can work both in a local area network and with access to the Internet WAN. The possibility of integrating such a system into general SCADA systems is described. The purpose and principle of measuring sensors are explained. The program code of both the web application itself and the program code that was used to program the microcontroller to convert the signal of the primary sensors are highlighted. The method of calibration of strain gauges is presented. The functional scheme of the primary level for measuring the torques of electric motors, as well as measuring current and voltage is highlighted. The algorithm of information system operation is described. Testing of this system on the metrological stand with the use of the collector electric motor of a direct current is carried out. However, its use has shown that the accuracy of such measurements has a significant error due to the use of non-industrial microcontrollers and low-cost sensors. However, by increasing the accuracy class of measuring instruments by using high-precision sensors, the information system can be used not only for measurement but also for control, which makes it universal in many areas of production.

Keywords: information system, torque, electric motors, sensors, power, current.