УДК 621.317

В. П. Квасніков, д.т.н., **Д. М. Квашук,** к.е.н., **М. О. Катаєва,** к.т.н.

Національний авіаційний університет, м. Київ

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

У статті представлено спосіб побудови інформаційно-вимірювальної системи діагностики робочих характеристик електродвигунів. З метою передачі даних отриманих від вимірювальних датчиків до серверного додатку використовувався мікроконтролер ESP8266. Запропоновано спосіб візуалізації отриманих даних з використанням web-серверних технологій. Проведено тестування запропонованої системи з використанням електродвигуна постійного струму серії RS-775. Досліджено робочі характеристики прототипу приладу для вимірювання обертального моменту електродвигуна, який використовувався у запропонованій вимірювальній системі. Визначено його похибку шляхом розрахунку вибіркового стандартного відхилення від очікуваних результатів.

Ключові слова: *вимірювання обертального моменту, електродвигун, засоби вимірювання, програмне забезпечення, мікроконтролер, обробка сигналу, протокол передачі даних, сервер.*

В. П. Квасников, д.т.н., **Д. М. Квашук,** к.е.н., **М. А. Катаева,** к.т.н.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В статье представлен способ построения информационно-измерительной системы диагностики рабочих характеристик электродвигателей. В целях передачи данных полученных от измерительных датчиков к серверному приложению использовался микроконтроллер ESP8266. Предложен способ визуализации полученных данных с использованием Web-серверных технологий. Проведено тестирование предложенной системы с использованием электродвигателя постоянного тока серии RS-775. Исследованы рабочие характеристики прототипа прибора для измерения крутящего момента электродвигателя, который использовался в предложенной измерительной системе. Определена его погрешность путем расчета выборочного стандартного отклонения от ожидаемых результатов.

Ключевые слова: *измерение крутящего момента, электродвигатель, средства измерения, программное обеспечение, микроконтроллер, обработка сигнала, протокол передачи данных, сервер.*

V. P. Kvasnikov, DSc, **D. M. Kvashuk,** PhD, **M. O. Kataieva,** PhD

DEVELOPMENT OF INFORMATION-MEASURING DIAGNOSIS SYSTEM WORKING CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MOTORS

The article explores a method for constructing an information-measuring system for diagnosing the performance characteristics of electric motors. The structure of such systems, features of signal transmission and methods of its transformation, as well as software for visualization and data processing are considered. Algorithmic and software developments are highlighted that provide a full cycle of processing the information parliaments of electric motors, from the transformation of a physical quantity into a unified signal, to data visualization.

The structure of microcontrollers, which were used in the development of the measuring system, is investigated. In particular, the performance of the ESP8266 microcontroller, which was used to transfer data received from measuring sensors to a server application. The method of visualization of the obtained data using web-server technologies is highlighted. The proposed system was tested using a DC electric motor of the RS-775 series. The error of the measuring sensors used in the proposed system is determined by calculating the sample standard deviation from the expected results.

Particular attention is paid to the development of server software in terms of processing signal parameters and visualizing its changes, the possibility of archiving arrays of received data, the possibility of changing the operating modes of the electric motor and ways of displaying information. The performance characteristics of a prototype device for measuring the torque of an electric motor based on an inductive sensor used as part of the proposed measuring system have been studied.

The article presents the possibilities of using an information-measuring system in combination with additional measuring devices that can be connected to it using a local network, thus forming a distributed sensor network of measuring devices interconnected via a radio channel. The expediency of building such networks for remote objects, where unified (WI-FI, WI-MAX, GSM) data transmission technologies can be used, is substantiated.

Keywords: *torque measurement, electric motor, measuring, software, microcontroller, signal processing, data transfer protocol, server.*

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-42-52

Вступ

Для визначення технічного стану та робочих характеристик електричних двигунів (ЕД) використовують аналіз електричної потужності, аналіз моменту сили, напруги та струмового сигналу.

Більшого поширення набули методи діагностування ЕД по струмовому сигналу, які реєструється з обмоток приводу. Це обумовлено мобільністю та оперативністю отримання результатів обстеження, можливістю проведення дистанційних вимірювань, коли доступ до об'єкта діагностування ускладнений, або неможливий.

В залежності від потреб в точності використовують і контактні засоби вимірювання обертальних моментів також, перетворюючи ряд фізичних величин в уніфікований сигнал.

В будь-якому випадку, прийняття рішення про технічний стан ЕД та їх робочих характеристик загалом, здійснюється на основі стандартизованої процедури вимірювання, об'єктивність якої визначається точністю даних, як вимірювальних приладів, так і ІВС. Тому, подальше підвищення точності результатів діагностичного обстеження ЕД може бути здійснено за рахунок вдосконалення використовуваних методів обробки даних та способів вимірювання.

Вимірювання обертального моменту валу електродвигуна в статичному режимі не викликає труднощів, проте вимірювання безперервно в процесі обертання є завданням більш складним, особливо коли це стосується мікроелектродвигунів.

Так, переважна більшість приладів для вимірювання обертального моменту ЕД побудовано на основі вимірювання струму, який прикладається до двигуна. Разом з цим, такі вимірювання не можна застосовувати для мікроелектродвигунів, оскільки невеликі потужності висувають ряд додаткових вимог до чутливості вимірювальних приладів.

Істотний вплив на показники точності сенсорів мають вібрації, нестабільності індуктивних характеристик, нестабільності напруги джерела живлення, температурний режим роботи, швидкість обертання валу та стан підшипникових вузлів електродвигуна.

В таких умовах, існує потреба в систематизації вимірювань шляхом обробки більшої кількості даних, що дозволить не лише отримувати поточні показники, а й проводити прогнозування зміни похибок та визначення потреб у калібруванні вимірювальних приладів, визначати критерії виникнення додаткових вібрацій, зміни температурних режимів, тощо.

В свою чергу, недостатня кількість інформативних параметрів, які можна отримати під час вимірювання робочих характеристик ЕД, звужує коло методів, що застосовуються для підвищення точності вимірювальних приладів.

Усе це, та багато інших не вирішених питань, пов’язаних із недостатньою кількістю інформативних параметрів вимірювання робочих характеристик ЕД, потребує створення гнучких та розподілених інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які мають поєднувати вимірювальні пристрої та засоби прогнозування аварійних режимів роботи ЕД в єдиний інформаційний простір підприємства.

Аналіз публікацій та досліджень

Сучасні системи діагностики робочих характеристик електродвигунів, окрім обертального моменту та потужності, використовують: вібродіагностику; аналіз електричних струмів та напруг; вимірювання теплових полів та магнітних полів, електромагнітну дефектоскопію [1, 2]. Широко застосовуються методи сигнатурного аналізу, які включають в себе методи обробки сигналу шляхом перетворення Фур'є, Гілберта-Хуана та вейвлет-перетворення [3, 4].

При дослідженнях електромеханічних систем часто виникає необхідність визначення обертальних моментів та прискорень.

Методологія вимірювання динамічних характеристик обертальних моментів ЕД та прискорень, недостатньо висвітлені в технічній літературі. Переважна більшість праць спрямована на вимірювання лінійних прискорень, а питанням вимірювання нелінійних кутових прискорень, приділяється мало уваги [5, 6]. Тому, актуальними є дослідження нелінійних характеристик роботи електродвигунів.

Так, для моделювання динамічних характеристик обертального моменту в роботі [7] представлено модифіковану формулу Клосса, яка пов'язує середнє значення обертального моменту електродвигуна та частоту обертання його валу, з урахуванням впливу частоти обертання та напруги живлення. За даною моделлю отримано механічні характеристики електродвигуна, які представляють залежність обертального моменту від частоти обертання валу ЕД, напруги мережі, частоти мережі та ряду інших номінальних параметрів. В даній роботі застосовано метод імітаційного моделювання моменту зупинки ЕД без навантаження. Реалізацію моделі було здійснено в середовищі Matlab/Simulink.

На основі запропонованого виразу було також побудовано модель для декількох робочих характеристик асинхронного ЕД змінного струму.

Моделювання здійснено з використанням програмної бібліотеки Matplotlib мовою програмування Python, що дозволило отримати наступні результати (рис. 1).

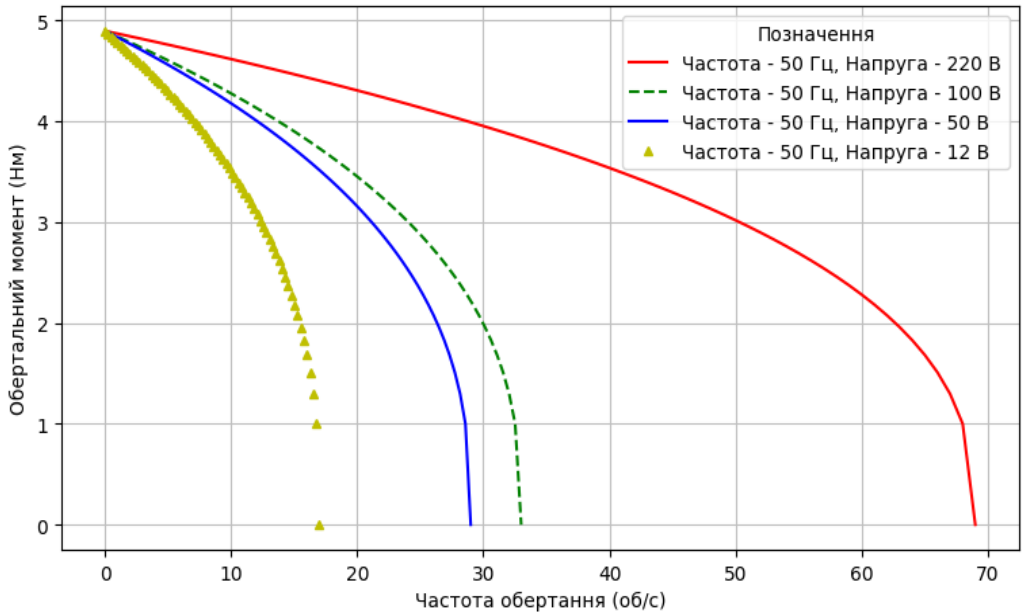

Рисунок 1 – Робочі характеристики ЕД

Розроблено на основі джерела [8] з використанням програмної бібліотеки Matplotlib

Так, при напрузі в 220 В частота обертання валу та момент сили у період моделювання (5 с) були найбільшими. Це говорить про адекватність моделі.

Разом з тим, вона не містить, параметрів струму та опору котушок статора. Не враховано електромагнітних вібрацій, які впливають на обертальний момент валу ЕД.

В роботі [8] представлено методику, що дозволяє визначити момент інерції ЕД обчислювальними засобами, тестування якої, з використанням корекції параметрів регуляторів приводу дозволило встановити параметри кривої розгону шляхом проведення імітаційного моделювання з використанням пакета SimPowerSystems у середовищі MatLab. Це дозволило вдосконалити методику вимірювання моменту інерції електроприводу на основі методу площ Симою [9]. Похибка при визначенні моменту інерції була 1,5 %. Цей метод дозволяє визначити передатні характеристики функції за кривою розгону. Але недоліком такого методу є те, що передатні характеристики для кожного окремого виду електродвигуна є різними та їх вибір для кожного має певні складнощі. Тестування даної методики на інших видах ЕД не проводились.

Модель визначення моменту сили ЕД під час його роботи представлена в роботі [10], яка

також враховує момент інерції та момент опору навантаження:

$$M - M_O = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ_\Sigma}{dt}, \qquad (1)$$

де M – обертальний момент;

M_O – момент опору навантаження;

J_Σ – сумарний момент інерції приводу, приведений до валу двигуна;

ω – кутова швидкість двигуна;

t – час.

Важливою складовою у вимірюванні обертального моменту є визначення коефіцієнта тертя. Тому, заслуговує уваги робота [11], де запропоновано стенд, робота якого заснована на вимірі навантаження на ЕД з урахуванням сили тертя. Таке навантаження фіксується амперметром, включеним до ланцюга ЕД, де коефіцієнт тертя визначається за залежністю:

$$f = \frac{\sqrt{3U}\left(I_{\text{н}} - I_{\text{х.р.}}\right)\cos\varphi \cdot \eta}{2V_{\text{к}} \cdot M}, \qquad (2)$$

де U – напруга;

$I_{\text{н}}$ – струм навантаження;

$I_{x.\text{р.}}$ – струм холостого ходу двигуна;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності (де φ – зсув фаз між силою струму та напругою);

η – К.К.Д. підшипників кочення;

$V_{\text{к}}$ – швидкість ковзання на контакті;

M – обертальний момент.

Зазначені методи вимірювання лежать в основі переважної більшості ІВС. Разом з тим, в багатьох випадках вибір методу залежить від умов, в яких проводиться вимірювання, де необхідно визначити найбільш оптимальні методи вимірювання. Так, в деяких випадках силою тертя, або вібрацією можна знехтувати, в той час, коли важливими параметрами виступають струм, напруга та потужність ЕД.

Для визначення потреб придатності вимірювального обладнання враховуються особливості отримання сигналу від перетворювачів різного типу та методи його обробки.

Разом з тим, комплексна ІВС має передбачати не лише засоби поточного вимірювання, але й сховище даних, де має зберігатися статистична інформація, яка може бути використана для визначення окремих режимів роботи ЕД.

Тому, слід звернути увагу на роботи, які висвітлюють не лише способи первинного збору даних та обробку сигналу, але й подальшу його візуалізацію та обробку на більш високому рівні [12].

Постановка завдання

Представити етапи розробки прототипу ІВС, яка призначена для вимірювання робочих характеристик ЕД. Зокрема обертального моменту, напруги, струму та швидкості обертання валу.

Розробка ІВС для дослідження робочих характеристик ЕД постійного струму на прикладі RS-775.

Вимірювання обертального моменту та швидкості роботи ЕД вимагає чутливості сенсорів. Такими, наприклад, є тензометричні сенсори. Тому для роботи у складі ІВС було вибрано тензометричний сенсор мостового типу (рис. 2). Тензометричний сенсор використано разом із мікросхемою HX711. Дана мікросхема є аналого-цифровим перетворювачем з розрядністю 24 біти та має вбудований операційний підсилювач [13].

На рис. 2 представлено: +Ex, -Ex – вхідна напруга; +S, -S – вихідний сигнал та R1-R4 – тензометричні резистори, які змінюють свій опір в залежності від деформації.

Запропонована мікросхема включає інтегральний стабілізатор напруги, що дозволяє не використовувати зовнішній стабілізатор.

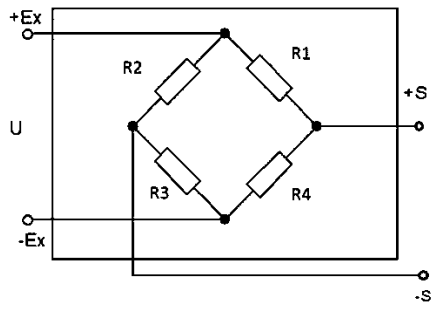

Рисунок 2 – Мостова схема тензометричного сенсора

Датчик швидкості обертання валу електродвигуна реалізований за принципом частотного вимірювача, який побудовано на базі оптичного сенсора, що фіксує обертання генеруючи імпульси з кожним обертом. Їх обробляє мікроконтролер Atmega 8 та передає отриманий результат до мікроконтролеру ESP32, використовуючи послідовну шину зв'язку I2C.

Оскільки Atmega 8 може виявляти лише прямокутні сигнали, для перетворення сигналу було використано тригер Шмітта, що являє собою цифровий логічний елемент, призначений для арифметичних і логічних операцій. Він має пороговий рівень напруги. Так, коли рівень вхідного сигналу вище порогового рівня елемента, рівень сигналу на виході буде високим. Якщо рівень вхідного сигналу нижче порога, на виході

буде низький рівень. Для цього була використана мікросхема 74LS14, яка містить 6 триггерів Шмітта.

Для вимірювання частоти в мікроконтролері Atmega 8 використовуються два типи переривання: переривання за переповненням таймеру T0 і зовнішнє переривання за зміною сигналу на вході мікроконтролера INT0. Восьми-бітний таймер T0 працює з частотою 1 МГц, для цього програмно було включено дільник частоти на 8. Обробник переривання при переповненні таймеру викликається 4000 разів у секунду, при цьому змінний лічильник збільшує своє значення на одиницю. Як тільки ця змінна стане рівною 4000, тобто пройде 1 секунда, в змінну edgecount буде внесено кількість отриманих імпульсів за цей період. Дані про кількість імпульсів будуть збережені у масив. Програмний код для обробки імпульсного сигналу мікроконтролером Atmega 8 має наступний вигляд:

```
#include<avr/interrupt.h>
#include<util/delay.h>
volatile unsigned int edgecount = 0, count = 0;
//  Обробник переривання по переповненню T0 //викликається 4000 разів на секунду
ISR(TIMER0)
{
TCNT0 = 6; // Лічильник T0 починає рахувати з // 6, оскільки 1MHz/(256-6) = 4000Hz
count++;
}
// обробник зовнішнього переривання
ISR(INT0)
{
edgecount++;
}
int main(void)
{
// Налаштування портів введення/виводу
DDRD = 0b11110011;
PORTD = 0x00;
// Налашування таймеру T0
TCCR0 |= (1 << CS01); // Дільник на частоти на 8 //для таймеру 1 MHz
TIMSK |= (1 << TOIE0); // Дозвіл на //переривання таймеру T0
// Налаштування зовнішнього переривання
GICR |= (1 << INT0); // Дозволяємо зовнішнє //переривання на вході INT0
MCUCR |= (1 << ISC01)|(1 << ISC00); // Зовнішнє //переривання формується по передньому фронту
sei(); // Глобально дозволяємо переривання
while(1)
{
// передаємо дані
if(count == 4000)
{
send_data(edgecount);
count = 0;
edgecount = 0;
}
}
}
```

Дані про кількість імпульсів за хвилину від датчика швидкості та цифровий сигнал від АЦП, а також цифровий сигнал від датчиків вимірювання напруги та струму електродвигуна обробляється мікроконтролером ESP32, який має вбудований WIFI – модуль.

Використовуючи відомі програмні бібліотеки для роботи з протоколом TCP/IP, даний мікроконтролер був використаний для відправки http повідомлень методом POST, які містять кількісні характеристики обертального моменту, напруги, струму та швидкості обертання валу безконтактного двигуна постійного струму.

Принцип вимірювання обертального моменту, який передається валом електродвигуна отримано за допомогою спеціальної муфти, яка приєднана до плеча, використовуючи наступний вираз

$$M = F \cdot R = F \cdot R \cdot \sin a, \qquad (3)$$

де: M – момент сили;

F – сила (Н);

R – плече сили (м);

a – кут між вектором сили F та вектором плеча сили R.

Функціональну схему ІВС представлено на рис. 3.

Оброблений сигнал передається до головного мікроконтролера ESP32 з використанням протоколу I2C. Програмний код мікроконтролера ESP32 [14] реалізує не лише збір даних від сенсорів, але й їх передавання з використанням WEB-протоколу http, використовуючи Wi-Fi модуль мікроконтролера. Так, дані передаються до серверного додатку, який дозволяє їх візуалізувати та зберегти в базу даних SQLITE.

Серверна частина написана мовою програмування Python, використовуючи ряд серверних бібліотек.

WEB-інтерфейс додатку реалізовано із використанням мови програмування JavaScript та програмної бібліотеки plotly.js. Ознайомитись з програмним кодом серверного додатку можна за посиленням [15].

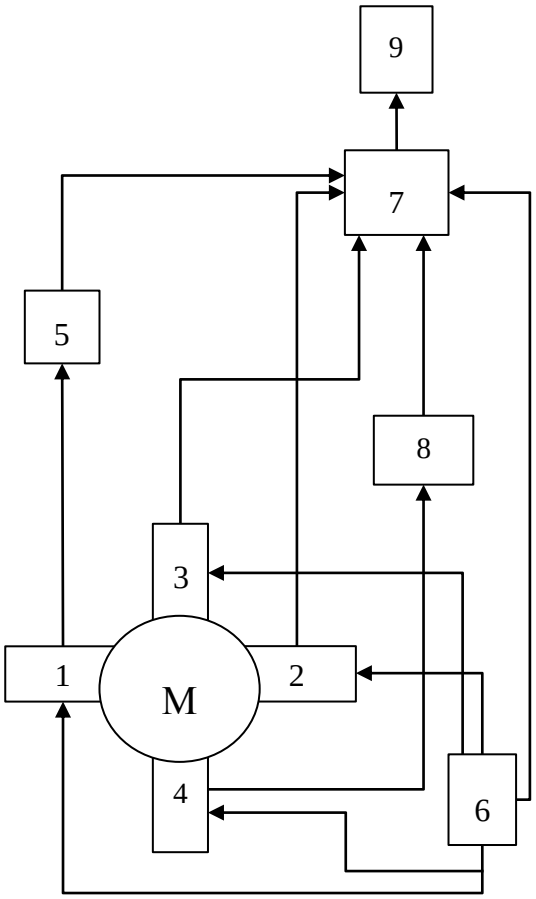

Рисунок 3 – Функціональна схема ІВС
М – електродвигун; 1 – оптичний сенсор, що фіксує обертання, генеруючи імпульси з кожним обертом валу електродвигуна; 2 – цифровий модуль для вимірювання напруги; 3 – цифровий модуль для вимірювання струму; 4 – тензометричний міст; 5 – мікроконтролер Atmega 8; 6 – джерело живлення; 7 – мікроконтролер ESP32; 8 – АЦП HX711; 9 – WEB-сервер

Для тестування запропонованої ІВС, в середовищі Matlab/Simulink, було побудовано модель електродвигуна RS-775 з наступними робочими характеристиками (табл. 1).

Метою такого моделювання, було порівняння робочих характеристик ЕД RS-775, які були отримані шляхом моделювання в середовищі Matlab/Simulink та характеристик отриманих під час прямих вимірювань з використанням розробленого стенда, який входить до складу ІВС (рис. 4).

Модель вимірювального каналу, яка застосовується в середовищі Matlab/Simulink представлено на рис. 5.

Сигнал з тензометричного сенсора задається блоком «Сенсор». Блок «Генератор шуму» імітує вібрацію, яка виникає під час обертання валу ЕД. Генератор імпульсів імітує оптичний сенсор для вимірювання частоти. Генератор зразкової частоти відтворює час, за який має відбуватись вимірювання імпульсів.

Таблиця 1 – Робочі характеристики електродвигуна RS-775

Номінальна напруга	V	6-12, В
Номінальний обертальний момент	T_e	1, Нм
Номінальна швидкість	N_r	3500, об/хв
Опір статора	R_s	5,5, Ом
Індуктивність статора	L	2,52, Гн
Інерція ротора	J_m	2,807, кг·м²
Кількість пар полюсів	P_n	2

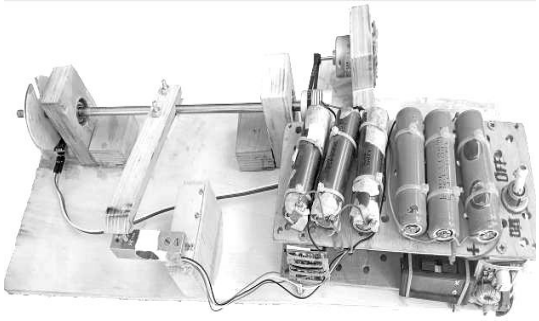

Рисунок 4 – Прототип приладу для вимірювання параметрів роботи ЕД

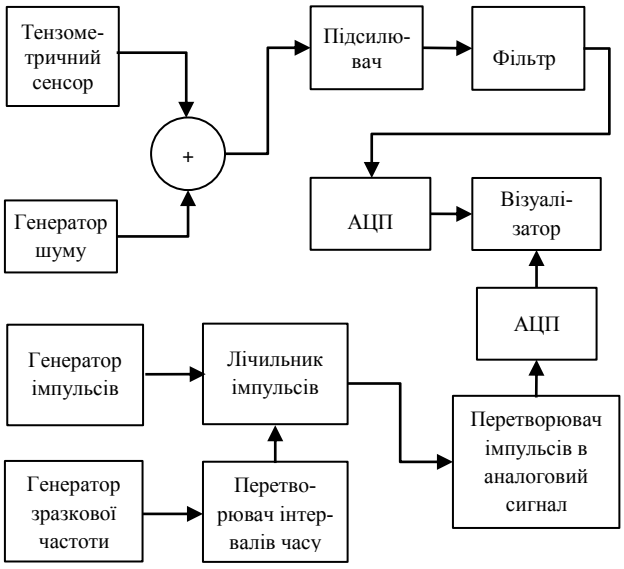

Рисунок 5 – Модель вимірювального каналу створена в Simulink

Лічильник імпульсів передає оброблений сигнал до перетворювача імпульсів в аналоговий

сигнал. Після чого сигнал надходить до АЦП та передається до візуалізатора.

У відповідності до джерела [16] передавальну функцію ЕД постійного струму по керуючому впливу з урахуванням перетворень можна записати наступним чином:

$$W_y(s) = \frac{I_я(s)}{U_y(s)} = \frac{k_I s}{\left(T_m T_e s^2 + T_m s + 1\right)}, \qquad (4)$$

де $T_m = \frac{JR_я}{C_w C_e}$ – 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 опору якірних обмоток ЕД та вхідного опору підсилювача, Ом; $L_я$ – сума індуктивностей якірного ланцюга двигуна та вихідного ланцюга підсилювача, Гн; J – момент інерції якоря, Нм^2; C_e – коефіцієнт моменту сили, Н·м; C_w – швидкості, В·с/рад; s – оператор Лапласа; U_y – напруга.

Змоделювавши криву розгону ЕД та його роботу за час в 0,25 с, отримаємо наступну робочу характеристику швидкості обертання (рис. 6)

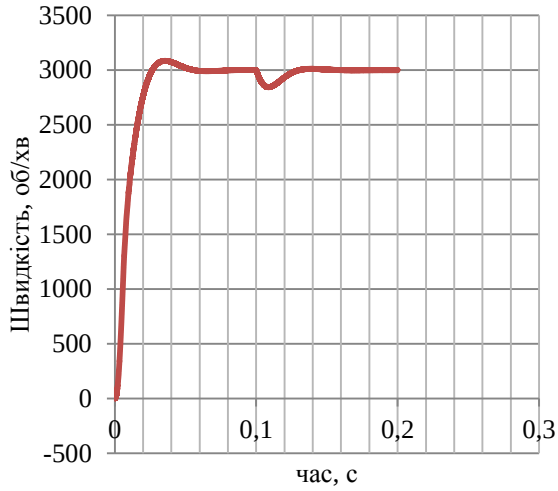

Рисунок 6 – Модель кривої розгону ЕД

Електромагнітний момент має наступні характеристики (рис. 7).

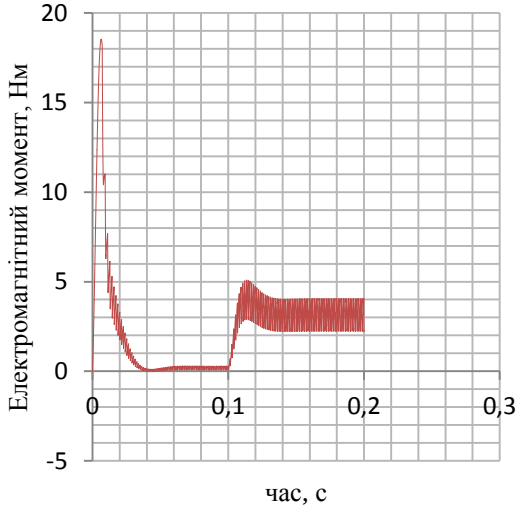

Рисунок 7 – Динаміка зміни електромагнітного моменту

Середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни електромагнітного моменту, отримане за виразом

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i - \bar{a})^2}, \qquad (5)$$

складає 3,86.

Динаміка зміни напруги представлена на рис. 8, де стрибки напруги обумовлені частотними характеристиками джерела живлення, моделювання якого реалізовано на прикладі імпульсного перетворювача.

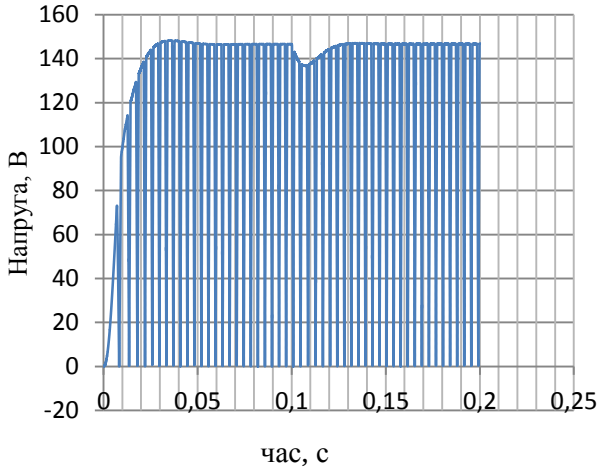

Рисунок 8 – Динаміка зміни напруги

Залежність швидкості обертання та електромагнітного моменту представлено на рис. 9, де видно, що на швидкості більше 1500 об/хв, момент сили набуває синусоїдальної форми. Саме в цей період, спостерігається вплив пульсуючого струму.

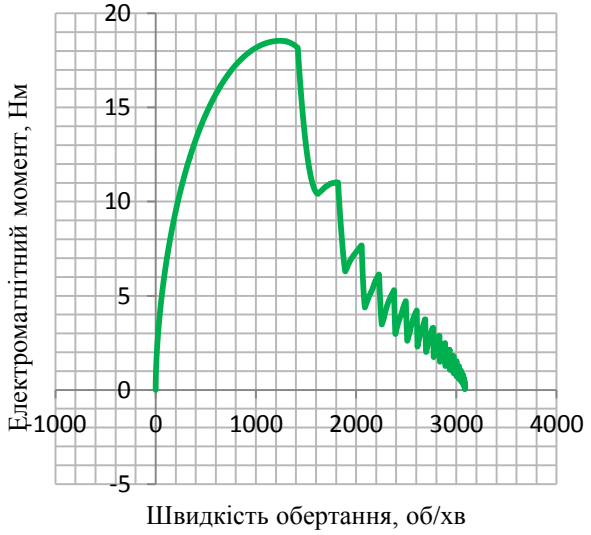

Рисунок 9 – Залежність обертального моменту та швидкості обертання ЕД

На рис. 7 видно вплив вібрації у вигляді відхилень постійної частоти, що значно ускладнює вимірювання. На рис. 9, також спостерігаються стрибки напруги у вигляді пульсацій.

Усе, та багато інших впливів на вимірювальний сигнал, які обумовлені його пульсацією потребує гасіння таких імпульсів шляхом згладжування кривої.

Для вирішення цієї проблеми, апроксимовано криву розгону, що представлена на рис. 7 методом віконних перетворювань Ханна (Хеммінга), в основі якого лежить згладжування розривів на початку та в кінці імпульсного сигналу [17]:

$$\omega(n) = 0,5 - 0,5\cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right),\ 0 \le n \le M-1, \quad (6)$$

де M – ширина вікна.

Після апроксимації кривої розгону, отримане середньоквадратичне відхилення склало 2,61, що дозволило зменшити похибку з 3,86 до 2,61. Результати представлено на рис. 10.

Тестування прототипу пристрою для вимірювання обертального моменту ЕД, який входить до складу запропонованої ІВС показало наступні результати.

Разом з тим, на рис. 11 видно, що під час запуску, коли двигун ЕД потребує найбільшого моменту сили, для того, щоб набрати потрібні оберти, такий спосіб не може бути використаний у зв'язку із значною похибкою. Так, на рис. 11, в точці X_n значення кривих отриманих в результаті апроксимації та вихідних параметрів сигналу отриманого у відповідності до функціональної схеми ІВС (рис. 3), суттєво різняться. Тому в цьому аспекті є потреба у подальших дослідженнях спрямованих на зменшення впливу шумів на результуючий вихідний сигнал.

Перехідна характеристика обертального моменту під час запуску ЕД та його роботи впродовж 20 с представлена на рис. 11, де з використанням виразу (6) було проведено подвійну апроксимацію кривої розгону, що дозволило скоротити стандартне відхилення, викликане вібрацією з 3,06 до 1,83.

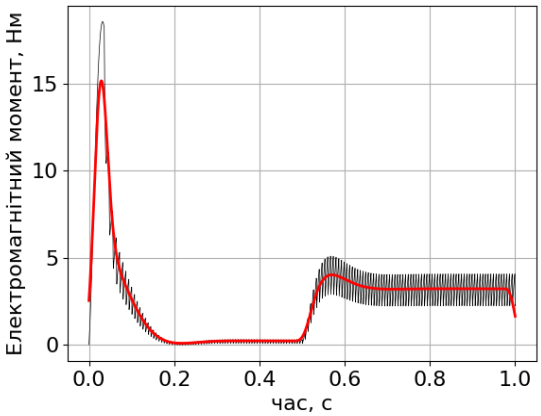

Рисунок 10 – Результати апроксимації кривої розгону шляхом зважування вікном Ханна (Хеннінга)

Створено з використанням програмної бібліотеки matplotlib

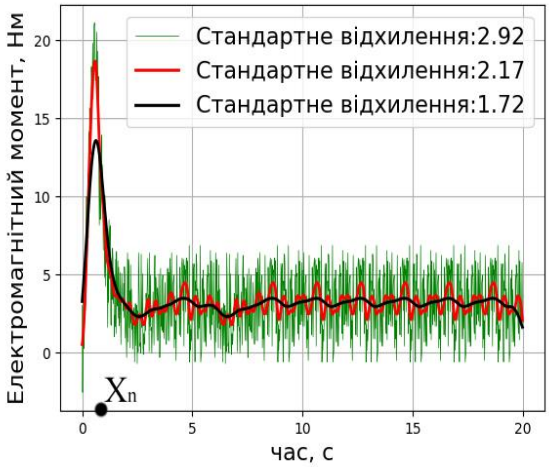

Рисунок 11 – Подвійна апроксимація сигналу, отриманого у відповідності до рис. 3, з використанням тензометричного сенсора

З метою дослідження похибки вимірювання швидкості, проведено порівняння отриманих результатів моделювання та експериментальних даних, які отримані з використанням вимірювального стенда. Для цього було проведено 5 експериментальних запусків ЕД та отримано криві розгону (рис. 12), де визначено відхилення від очікуваних результатів, середнє значення якого склало 20 %.

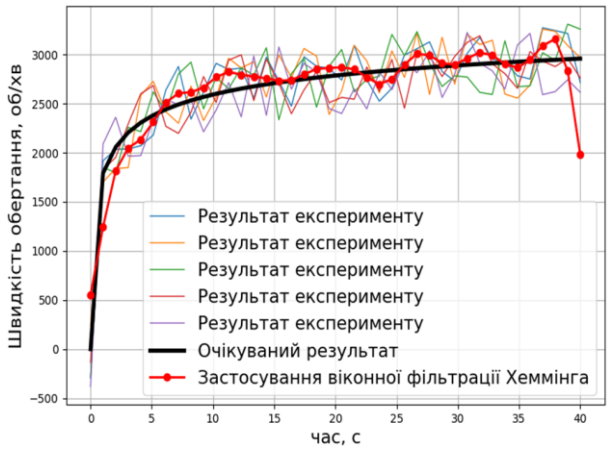

Рисунок 12 – Криві розгону ЕД

До отриманих в результаті дослідження кривих було застосовано вираз (6), що дозволило зменшити відхилення до 17 %. Так, стандартне відхилення отриманих результатів склало 5,8. Після застосування виразу (6) стандартне відхилення склало 5,02.

Висновки

Реалізація методів безпосереднього вимірювання у запропонованій ІВС з використанням датчика HX711 для вимірювання обертального моменту та лічильника імпульсів, які генерує оптичний сенсор з метою вимірювання швидкості обертання валу ЕД, дозволила отримати наступні результати.

Проведення імітаційного моделювання параметрів ЕД постійного струму в середовищі Matlab/Simulink, дозволило отримати перехідні характеристики сигналу від тензометричного сенсора створеного для імітації вимірювання обертального моменту. З метою моделювання швидкості обертання валу. Для моделювання вібрації, був створений генератор імпульсів регульованої частоти.

Застосована в моделі передавальна функція (4) показала, що вплив вібрації зменшує точність вимірювання, середньоквадратичне відхилення якого склало 3,86 %. Для нівелювання такого впливу було використано віконне згладжування Хеммінга (6), що дозволило частково зменшити вплив вібрації. Середньоквадратичне відхилення в такому випадку складало 1,83 %.

Такий спосіб було застосовано для запропонованого вимірювального стенда провівши серію послідовних вимірів. Середньоквадратичне відхилення при вимірюванні обертального моменту вдалось зменшити з 2,92 % до 1,72 %. Похибку при вимірювання швидкості зменшено з 5,8 % до 5,02 %.

Список використаних джерел

1. Вахромеев О. С., Каримов Р. Т., Надеев А. И. Современные методы диагностики электромеханических систем. М.: Машиностроение, 2005. С. 51-56. DOI: 10.7463/1015.0820865

2. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23, iss. 8, pp. 2658-2670. DOI:10.1016/j.ymssp.2009.05.011

3. Ayaz E., Ozturk A., & Seker S. (2006). Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. *IEEE Electrotechnical Conference, MELECON*. Mediterranean, pp. 1130-1133.

4. Cabal-Yepez E., Osornio-Rios R., Romcro-Troncoso R., Razo-Hernandcz J., & Lopez-Carcia, R. (2009). FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. *International Conference on Reconfigtirable Computing and FPGAs*, pp. 101-106.

5. Мансуров Т. М., Алиев Ч. П. Акселерометр для измерения параметров движущихся объектов. *Научный журнал «Проблемы инфокоммуникаций» Белорусской государственной академии связи*. Минск, 2017. № 2 (6). С. 37-46.

6. Мансуров Т. М., Алиев Ч. П. Акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов в автоматическом режиме. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні нуки.* 2018. № 5 (265). С. 78-83.

7. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.

8. Ермаков К. С., Тумакова Е. В. Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя. *Наука и Образование*. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 211-220. DOI: 10.7463/1015.0820865

9. Стельмащук С. В. Определение момента инерции электропривода по кривой разгона методом Симою. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2015. Т. 326. № 6. С. 103-113.

10. Симою М. П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования. *Автоматика и телемеханика*. 1957. № 6. С. 514-527.

11. Кононенко Е. В., Данчинов Б. А. Влияние момента инерции и момента сопротивления привода на переходные процессы пуска и реверса рольганговых двигателей. *Известия Томского политехнического института*. 1971. Т. 212:

Электрические машины. С. 496-502.

12. Юсупов Р. Р. Жиркин Ю. В., Мироненков Е. И., Губарев Е. В. Исследование влияния карбонитрирования на снижение коэффициента трения. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*: материалы 72-й международной научно-технической конференции / под ред. В. М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. Т.1. С. 214-216.

13. Жидков В. А. Сравнительный анализ SCADA-систем, применяемых в диспетчерских службах Белгородской энергосистемы. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2012. № 1. С. 185-189.

14. Тензодатчики и HX711. Руководство пользователя [Электронный ресурс]: за данными сайта wiki.iarduino.ru / Режим доступа: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo.

15. Maier A., Sharp A., Vagapov Y. "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things" 2017 *Internet Technologies and Applications, ITA 2017* – Proceedings of the 7th International Conference IEEE, pp 143-148, November 2017, DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.

16. Квашук Д. Програмний код WEB-додатку інформаційної системи для вимірювання параметрів роботи електродвигунів [Електронний ресурс]. 2021. Режим доступу: http://dmitro.pythonanywhere.com.

17. Рубанов В. Г., Бушуев Д. А., Паращук Е. М., Трикула А. К. Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019. Т. 23, № 2. С. 97-108. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.

18. Douglas A. Time Sequence Analysis in Geophysics E. R. Kanasewich (University of Alberta Press), *Geophysical Journal International*, Volume 43, Issue 3, December 1975, Page 1026, DOI:10.1093/gji/43.3.1026.

References

1. Vakhromeev O. S., Karimov R. T., Nadeev A. I. Sovremennye metody diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem [Modern methods of diagnosis of electromechanical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, pp. 51-56. DOI: 10.7463/1015.0820865

2. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2009. Vol. 23, iss. 8. P. 2658-2670. DOI: 10.1016/j.ymssp.2009.05.011

3. Ayaz, E., Ozturk, A., & Seker, S. (2006). Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. *IEEE Electrotechnical Conference, MELECON.* Mediterranean, pp. 1130-1133.

4. Cabal-Yepez E., Osornio-Rios R., Romcro-Troncoso R., Razo-Hernandcz J., & Lopez-Carcia, R. (2009). FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. *International Conference on Reconfigtirable Computing and FPGAs*, pp. 101-106.

5. Mansurov T. M., Aliev Ch. P. Akselerometr dlya izmereniya parametrov dvizhushhixsya ob"ektov. [Accelerometer for measuring the parameters of moving objects]. *Nauchnyj zhurnal «Problemy infokommunikacij» Belorusskoj gosudarstvennoj akademii svyazi*. Minsk, 2017. № 2 (6). S. 37-46.

6. Mansurov T. M., Aliev Ch. P. Akselerometr dlya izmereniya uskorenij i skorostej dvizhushhixsya ob"ektov v avtomaticheskom rezhime. [The Accelerometer for Measurement of Accelerations And Speeds of Moving Objects in the Automatic Mode] *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nuky.* 2018. # 5 (265). S. 78-83.

7. Brindli K. Izmeritel'nye preobrazovateli: Spravochnoe posobie: Per. s angl. M.: E'nergoatomizdat, 1991. 144 s. [Brindley K. Sensors and Transducers. London, 1988]

8. Ermakov K. S., Tumakova E. V. Informacionno-izmeritel'naya sistema dlya kontrolya e'lektricheskix i mexanicheskix parametrov e'lektrodvigatelya. *Nauka i Obrazovanie*. MGTU im. N.E'. Baumana. E'lektron. zhurn. 2015. № 10. S. 211-220.

9. Stel'mashhuk S. V. Opredelenie momenta inercii e'lektroprivoda po krivoj razgona metodom Simoyu. [Identification of Electric Drive Inertia Moment on the Reaction Curve by Simoyu Method]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* 2015. № 6. S. 103-113.

10. Simoyu M. P. Opredelenie koe'fficientov peredatochnyx funkcij linearizovannyx zven'ev sistem regulirovaniya. *Avtomatika i telemexanika.* 1957. № 6. S. 514-527.

11. Kononenko E. V., Danchinov B. A. Vliyanie momenta inercii i momenta soprotivleniya privoda na perexodnye processy puska i reversa rol'gangovyx dvigatelej. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo instituta.* 1971. T. 212: E'lektricheskie mashiny. S. 496-502.

12. Yusupov P. P. Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Gubarev E. V. Issledovanie vliyaniya karboni-

trirovaniya na snizhenie koe'fficienta treniya. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, texniki i obrazovaniya*: materialy 72-j mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii / pod red. V.M. Kolokol'ceva. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. texn. un-ta im. G.I. Nosova, 2014. T.1. S. 214-216.

13. Zhidkov V. A. Sravnitel'nyj analiz SCADA-sistem, primenyaemyx v dispetcherskix sluzhbax Belgorodskoj e'nergosistemy. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuxova*. 2012. № 1. S. 185-189.

14. Tenzodatchiki i NX711. Rukovodstvo pol'zovatelya [E'lektronnyj resurs]: za dannymi sajta wiki.iarduino.ru / Rezhim dostupa: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo.

15. Maier A., Sharp A., Vagapov Y. "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things" 2017 *Internet Technologies and Applications, ITA 2017* – Proceedings of the 7th International Conference IEEE, pp 143-148, November 2017, DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.

16. Kvashuk D. Prohramnyi kod WEB-dodatku informatsiinoi systemy dlia vymiriuvannia parametriv roboty elektrodvyhuniv [Elektronnyi resurs]. 2021. Rezhym dostupu: http://dmitro.pythonanywhere.com.

17. Rubanov V. G., Bushuev D. A., Parashchuk E. M., Trikula A. K. Identifikatsiya momenta inertsii yakorya dvigatelya postoyannogo toka i nagruzki v e'ksperimental'noy vibratsionnoy ustanovke dlya issledovaniya khaoticheskoy dinamiki [Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.* 2019. T. 23, № 2. S. 97-108.

18. Douglas A. Time Sequence Analysis in Geophysics E. R. Kanasewich (University of Alberta Press), *Geophysical Journal International*, Volume 43, Issue 3, December 1975, Page 1026, DOI:10.1093/gji/43.3.1026.

Надійшла до редакції 28.08.2021