

Łukasz KNYPIŃSKI*, Kamil HOMEJA*

STANOWISKO DO BADANIA PARAMETRÓW BEZSZCZOTKOWYCH SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO

W pracy przedstawiono stanowisko do badania parametrów bezszczotkowych silników prądu stałego (BLDC). Stanowisko umożliwia pomiar wielkości mechanicznych oraz elektrycznych badanego silnika BLDC. Użytkownik może obserwować przebiegi prądów pasmowych oraz mierzyć ich wartości skuteczne. Możliwa jest również obserwacja sygnału generowanego przez jeden z hallotronów oraz pomiar częstotliwości tego sygnału. Opracowane stanowisko pozwala na pomiar momentu obciążenia oraz prędkości obrotowej silnika. Stanowisko wykorzystuje moduł Arduino Nano. Omówiono budowę stanowiska oraz przedstawiono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych.

SŁOWA KLUCZOWE: stanowisko laboratoryjne, bezszczotkowe silniki prądu stałego, Arduino Nano, pomiary wielkości elektrycznych i mechanicznych.

1. WPROWADZENIE

Współcześnie obserwujemy bardzo dynamiczny rozwój elektrycznych układów napędowych, różniących się zarówno parametrami funkcjonalnymi jak i zasadą działania. Najczęściej, układ napędowy składa się z: (a) elementu wykonawczego – silnika, (b) układu sterowania oraz (c) mechanicznych elementów łączących [1]. Układy napędowe znajdują zastosowanie w pojazdach [2], automatyce przemysłowej [3], urządzeniach elektronicznych, czy nawet w urządzeniach medycznych.

Ważną częścią układu napędowego jest maszyna elektryczna, przetwarzająca energię elektryczną na mechaniczną. Dobór maszyny (silnika) jest często uzależniony od wymagań stawianych przed układem napędowym. Projektant układu napędowego musi zdecydować, czy najważniejsza jest energooszczędność, niezawodność, czy może prostota sterowania [4].

Komutatorowe silniki prądu stałego były bardzo często stosowane w różnorodnych urządzeniach, charakteryzowały się dobrymi właściwościami regulacyjnymi. Wadami tego typu maszyn były relatywnie niska sprawność oraz problemy związane z eksploatacją, tj. niska trwałość zestyku ślizgowego w postaci szczotek i komutatora. Silniki prądu stałego o klasycznej konstrukcji są współcześnie nadal stosowane do napędu pojazdów elektrycznych [5].

* Politechnika Poznańska

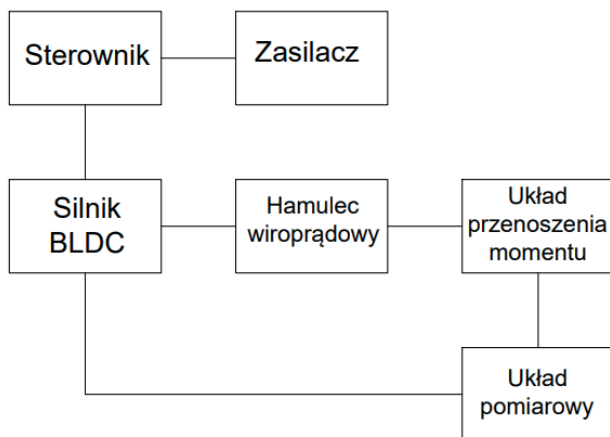
Wysokie wymagania dotyczące energooszczędności oraz ochrona środowiska naturalnego sprawiły, że klasyczne silniki prądu stałego nie są obecnie powszechnie stosowane [6]. Współcześnie rozwój inżynierii materiałowej (magnesy trwałe) [7] oraz spadek cen materiałów półprzewodnikowych, doprowadził do wzrostu zainteresowania bezszczotkowymi silnikami prądu stałego (ang. BLDC – Brushless Direct Current). Ich żywotność, cichobieżność oraz prosta budowa sprawiają, że są poważnymi konkurentami w stosunku do innych tego typu maszyn elektrycznych [8].

Celem pracy był projekt i wykonanie stanowiska do analizy właściwości i parametrów silnika BLDC. Opracowane stanowisko umożliwiła pomiary parametrów elektrycznych i mechanicznych badanego silnika. Możliwa jest obserwacja wpływu momentu obciążania na kształt prądów badanej maszyny oraz obserwacja zjawiska komutacji pasm.

2. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO

2.1. Struktura stanowiska

Stanowisko do badania magnetoelektrycznych silników komutowanych elektronicznie składa się z: (a) silnika BLDC, (b) sterownika, (c) zasilacza, (d) układu hamulca wiroprądowego, (e) układu pomiarowego. Schemat blokowy stanowiska przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska

Głównym elementem stanowiska jest hamulec wiroprądowy, składający się z aluminiowej tarczy nakładanej na wał silnika oraz tarczy wykonanej z materiału ferromagnetycznego (stal) na której umieszczony jest układ magnesów trwałych. Moment obciążenia powstaje w wyniku zjawiska indukowania się

prądów wirowych w wirującej tarczy. Sterownik (komutator elektroniczny) został dobrany tak, aby płynnie sterować prędkością obrotową silnika i momentem elektromagnetycznym wytwarzanym przez silnik [9]. Układ przenoszenia momentu pozwala na precyzyjne zmiany obciążenia, poprzez zmiany odległości tarczy wykonanej z materiału ferromagnetycznego względem aluminiowej tarczy umieszczonej na wale silnika BLDC.

2.2. Opis modułu pomiarowego

Głównym elementem układu pomiarowego jest moduł Arduino Nano, który jest zminimalizowaną wersją mikrokontrolera Arduino Uno. Ze względu na swoje niewielkie rozmiary, bardzo dobrze nadaje się do zastosowania w opracowanym stanowisku do badania parametrów i charakterystyk silnika BLDC. Wykorzystanie Arduino Nano pozwala w łatwy sposób wykonać pomiar wartości siły działającej na układ przenoszenia momentu oraz wyznaczyć wartość prędkości obrotowej silnika.

Moment obciążenia wyznaczany jest na podstawie wartości siły działającej na belkę tensometryczną przeznaczoną do współpracy z modułem Arduino. Sygnał elektryczny generowany przez belkę tensometryczną jest wzmacniany przez wzmacniacza HX711. Wzmacniacz przetwarza sygnał z czujnika na sygnały napięciowe w standardzie przemysłowym. Wzmacniacz został zastosowany również w celu wzmacniania sygnałów różnicowych, dzięki czemu uzyskuje się wyniki pomiarowe o dużej dokładności [10].

Układ pomiarowy realizuje pomiar prędkości obrotowej silnika w czasie rzeczywistym. Pomiar jest realizowany dzięki rejestracji ilości impulsów z wyjścia modułu czujnika IR (ang. InfraRed). Impulsy z modułu czujnika są zliczane, a następnie moduł Arduino Nano wyznacza aktualną wartość prędkości wału badanej maszyny. Autorzy opracowali program pozwalający na wyznaczenie prędkości silnika BLDC wykorzystując moduł Arduino.

Przy pomocy odpowiednich operacji wykonywanych przez mikrokontroler, bieżące wartości prędkości i momentu obciążenia są wyświetlane na wyświetlaczu LCD.

Aby układ pomiarowy mógł w odpowiedni sposób współpracować z pozostałymi elementami wykonawczymi stanowiska opracowano autorski program, w którym zostały określone warunki działania poszczególnych podzespołów oraz odpowiednie sekwencje pomiarowe. Kod programu do obsługi urządzeń wchodzących w skład układu pomiarowego został napisany w środowisku programistycznym Arduino IDE [11] (ang. Integrated Development Environment).

W celu uzyskania pomiaru momentu obciążenia o dużej dokładności, przed wgraniem do mikrokontrolera właściwego programu zawierającego kod obsługujący wszystkie elementy układu pomiarowego, konieczne jest przeprowadze-

nie procesu kalibracji belki tensometrycznej. W programie właściwym wykorzystano biblioteki do obsługi wyświetlacza LCD oraz wzmacniacza HX711. Pomiar oraz wyznaczenie aktualnej prędkości obrotowej wykonywane są jako przerwanie, co wpływa znacząco na szybkość działania mikrokontrolera. Rysunek 2 przedstawia kod programu opracowanego przez autorów na potrzeby budowy stanowiska.

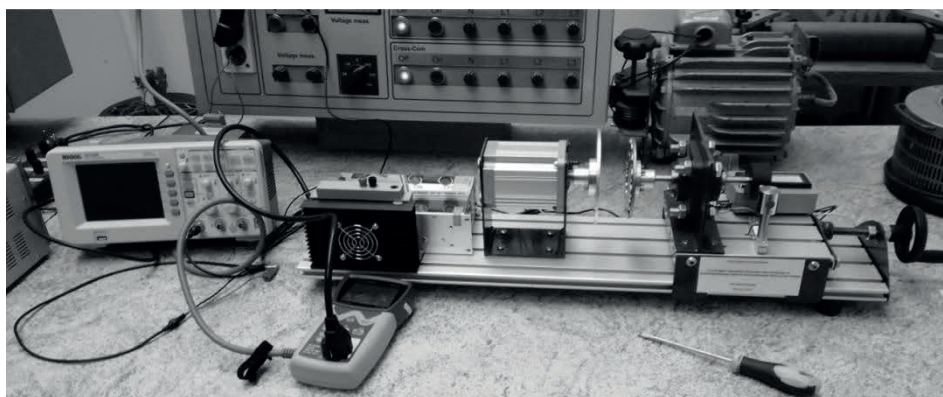
```

1  #include <LiquidCrystal.h>           //Dołączenie
2  LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12); //Określenie
3
4  #include "HX711.h"                 //Dołączenie
5  #define DOUT 4                     //Pin do któr
6  #define CLK 3                      //Pin do któr
7  HX711 scale(DOUT, CLK);
8  float wsp_kal = -459;              //Współczynni
9
10 #define irPIN 2                    //Przypisanie
11 #define bieguny 1                  //Przypisanie
12 #define srednia_tab 15             //Przypisanie
13 unsigned long lasttime;            //Ostatnie we
14 float obroty;                      //Aktualna pr
15 float oldobroty=0;                 //Ostatnia zn
16 unsigned long lastSerial =0;        //Ostatni cz
17 int licznik=0;
18 bool srednia_inicj = false;
19 float suma = 0;
20 float obroty_tab[srednia_tab];
21
22 void setup() {
23     pinMode(irPIN, INPUT_PULLUP);   //Ustawienie pir
24     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(irPIN), fczIR ,
25     |
26     | lasttime = 0;
27     | scale.set_scale();
28     | scale.tare();                  //Wyzerowanie wagi
29     | for(int i=0; i<srednia_tab; i++){
30     | | obroty_tab[i] =0;
31     | }
32 }
33
34 void loop() {
35     lcd.clear();                   //Wyczyszczenie wyświet
36     lcd.begin(20, 4);               //Deklaracja typu wy
37     lcd.setCursor(0, 0);           //Ustawienie kursora
38     lcd.print("Predkosc :");       //Wyświetlenie tekst
39     lcd.setCursor(0, 1);
40     lcd.print("n = ");
41     lcd.setCursor(4,1);
42     lcd.print(suma,0);              //Wyświetlanie odczy
43     lcd.setCursor(11,1);
44     lcd.print("obr/min");
45     lcd.setCursor(0, 2);
46     lcd.print("Nacisk :");
47     lcd.setCursor(11, 2);
48     lcd.print("Moment :");
49     lcd.setCursor(0, 3);
50     lcd.print("m=");
51     lcd.setCursor(2, 3);
52     scale.set_scale(wsp_kal);       //Zastosowani

```


Stanowisko umożliwia również pomiar wartości oraz obserwacje przebiegu prądu pasmowego silnika, dzięki wykorzystaniu sondy prądowej połączonej z oscyloskopem, co umożliwia uniknięcie konieczności przzerwiania ciągłości obwodu elektrycznego. Użytkownik stanowiska ma możliwość obserwacji przebiegu sygnału generowanego przez jeden z czujników hallotronowych oraz wyznaczenie częstotliwości tego sygnału co w łatwy sposób umożliwia obserwację zmian częstotliwości czujnika w funkcji prędkości obrotowej wału.

Stanowisko zostało również zaopatrzone w odpowiednią obudowę układu pomiarowego, osłonę oraz pokrętło regulacji prędkości dla zwiększenia bezpieczeństwa i wygody użytkowników. Obudowa oraz pokrętło zostało wykonane przy wykorzystaniu drukarki 3D.



Rys. 3. Widok stanowiska do badania bezszczotkowego silnika prądu stałego

3. WYNIKI POMIARÓW

Przeprowadzono badania eksperymentalne silnika BLDC o następujących parametrach znamionowych: moment znamionowy – $T_N=1,6$ Nm, znamionowa moc mechaniczna – $P_N=0,5$ kW, prędkość znamionowa $n_N=3000$ obr/min [13].

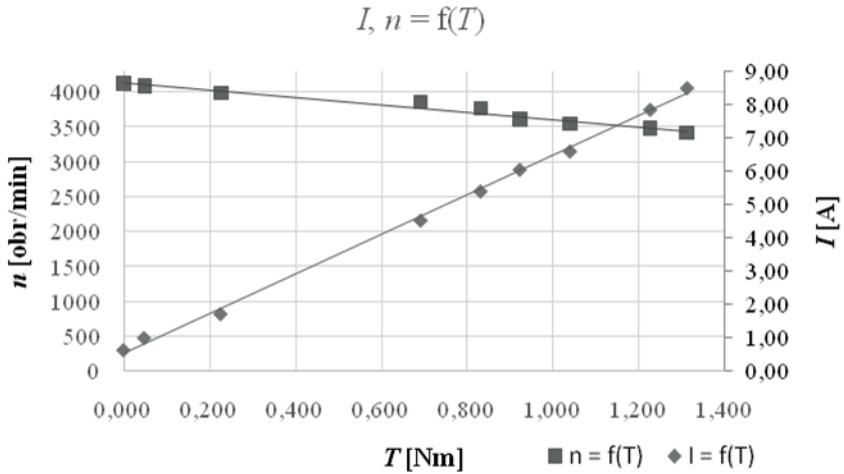
Wykonano pomiary prędkości obrotowej, prądu pasmowego oraz momentu obciążenia dla znamionowych parametrów zasilania oraz maksymalnej wartości prędkości obrotowej dla stanu jałowego. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 1.

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki parametrów funkcjonalnych badanego silnika ($n=f(T)$ oraz $I=f(T)$).

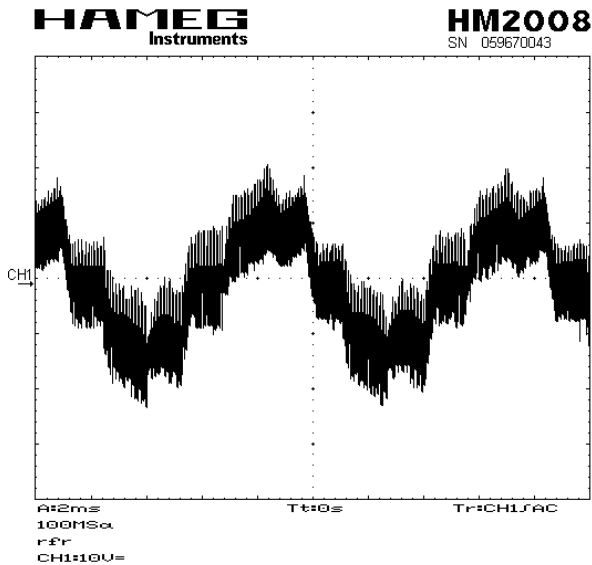
Przykładowe przebiegi prądu pasmowego oraz sygnału generowanego przez wybrany czujnik hallotronowy dla momentu obciążenia wynoszącego 1,32 Nm przedstawiono na rysunkach 5 oraz 6.

Pomiar wartości prądu pasmowego został wykonany przy wykorzystaniu sondy cęgowej podłączonej do oscyloskopu. Sonda pomiarowa podczas pomia-

rów ustawiona była na zakresie 20mV/A. Sonda umożliwiała realizację pomiarów w zakresie do 200 kHz.



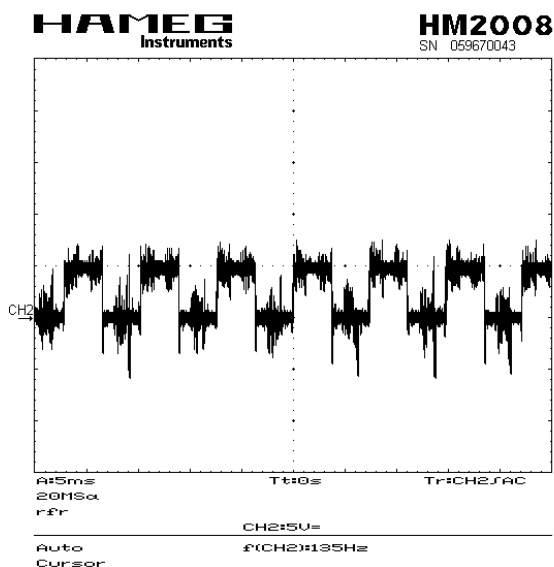
Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne badanego silnika przy maksymalnej wartości w stanie biegu jałowego



Rys. 5. Przebieg prądu pasmowego silnika dla maksymalnej wartości w stanie jałowym

Tabela 1. Wyniki pomiarów dla znamionowych parametrów zasilania.

<i>Lp.</i>	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>I</i>
	[obr/min]	[Nm]	[A]
1	4120	0	0,64
2	3988	0,23	1,72
3	3850	0,69	4,53
4	3610	0,92	6,05
5	3480	1,04	6,61
6	3420	1,32	8,51
7	3160	1,41	9,84
8	3025	1,58	11,81



Rys. 6. Przebieg prądu pasmowego silnika dla maksymalnej wartości prędkości w stanie jałowym

Otrzymane w wyniku pomiarów charakterystyki mechaniczne (rys. 4) są zgodne z wynikami badań symulacyjnych oraz danymi prezentowanymi w katalogowych maszyn BLDC [14-16].

7. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono stanowisko do badania parametrów bezszczotkowych silników prądu stałego. Stanowisko umożliwia pomiar wielkości elektrycznych (prądy pasmowe) oraz mechanicznych (prędkość obrotowa oraz moment obciążenia). Użytkownik może również obserwować przebiegi: (a) sygnału generowanego przez jeden czujnik hallotronowy oraz (b) prądu wybranego pa-

sma. Wykorzystując miernik energii pobranej przez układ napędowy użytkownik może wyznaczyć sprawność badanego silnika dla różnych wartości obciążeń.

Zastosowanie mikrokontrolera Arduino Nano wraz z współpracującymi modułami pozwala na pomiar wielkości mechanicznych ma wale silnika.

Wykorzystując stanowisko wykonane zostały pomiary eksperymentalne dla znamionowych parametrów zasilania oraz maksymalnej prędkości podczas biegu jałowego. Uzyskane wyniki pomiarów są zbieżne z wynikami katalogowymi.

LITERATURA

- [1] Knypiński Ł., Kurpiński J., The slewing drive system for tower crane with permanent magnet synchronous motor, “Archives of Electrical Engineering”, vol. 70, no. 1, p. 189 – 201, 2021.
- [2] Kong Z., Zhang W., Zhang H., Testing and Evaluation of the Electric Drive System on the Vehicle Level, World Electrical Vehicle Journal vol. 12, no. 182, pp. 1–9. 2021.
- [3] Dongwei G., Ruihua N., Wenbo H., Guang C., Ligang J., Research on preventive maintenance strategy of Coating Machine based on dynamic failure rate, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 25. no. 1, pp. 1–13, 2023.
- [4] Knypiński Ł., Krupiński J., The Energy Conversion Efficiency in the Trolley Travelling Drive System in Tower Cranes, 15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 08-10 December 2019, Zakopane, Poland, pp. 1 – 6.
- [5] Bitar Z., Sandouk A., Al Jabi S., Testing the Performances of DC Series Motor Used in Electric Car, Energy Procedia, vol. 74, pp. 148 – 159, 2015.
- [6] Liu H., Gao Z., Wu W., Chow L., Wu T., Design of a high-efficiency permanent magnet synchronous motor and inverter system, Design of a high-efficiency permanent magnet synchronous motor and inverter system, 09-12 November 2015, Yokohama, Japan, pp. 1 - 4. 2015.
- [7] Dobzhanskyi O., Grebenikov V., Gouws R., Gamaliia R., Hossain E., Comparative Thermal and Demagnetization Analysis of the PM Machines with Neodymium and Ferrite Magnets, Energies, vol. 15, no. 4484, pp. 1 -15, 2022.
- [8] Dahbi M., Doubabi S., Rachid A., Oulad-Abbou D., Performance evaluation of electric vehicle brushless direct current motor with a novel high-performance control strategy with experimental implementation, Journal of Systems and Control Engineering, vol. 234, no. 3. pp. 1 - 12, 2019.
- [9] Krykowski K., Silniki PM BLDC – Właściwości, sterowanie, aplikacje, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2015.
- [10] <https://dedykujemy.com/wzmacniacz-tensometryczny-w-jaki-sposob-dzialala/>, [dostęp z dnia 02.09.2023].
- [11] Bird C., Menzies T., Zimmermann T., The Art and Science of Analyzing Software Data, Elsevier Inc, 2016.

- [12] Homeja K., Projekt i wykonanie stanowiska laboratoryjnego do zautomatyzowanego badania bezszczotkowego silnika prądu stałego, Praca dyplomowa inżynierska, Poznań, 2023.
- [13] <https://sklep.akcesoria-cnc.pl/silnik-bezszczotkowy-blde-500w-48v-3000rpm-16nm-p-20.html> (dostęp 12 września 2023 roku).
- [14] Knypiński Ł., Reddy A. V., Venkateswararao B., Devarapalli R., Optimal design of brushless DC motor for electromobility propulsion applications using Taguchi method, *Journal of Electrical Engineering*, vol. 74, no. 2, s. 123-128, 2023.
- [15] <https://www.dunkermotoren.com/> (dostęp 12 września 2023 roku).
- [16] Shah P., Ubare P., Ingole D., Sonawane D., Performance Improvement of BLDC Motor Speed Control Using Sliding Mode Control and Observer, *International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA)*, 20-22 September 2021, Goa, India, 2021, pp. 1-6.

COMPUTER LABORATORY STAND TO INVESTIGATION BRUSHLESS DC MOTORS

In the paper, the stand to experimental determination of the parameters of the BLDC motor was presented. The stand enables the measurement of the electrical and mechanical parameters. The developed stand allows the measurement of: (a) electric parameters – phase currents and frequency of signal generated by selected hall sensors, and (b) mechanical parameters – loading torque and rotational velocity. Additionally, user can observe the waveforms of phase current and measure their rms values using oscilloscope. It is possible to observation signal generated by one of the Hall effect sensors and measure the frequency. To the construction stand the Arduino Nano module has been applied. Selected results of experimental measurements are presented and discussed.

(Received: 15.09.2023, revised: 20.11.2023)