

**Andrzej Sikora, Adam Zielonka, Tomasz Rudnicki**  
 Politechnika Śląska, Gliwice

## PORÓWNANIE NAGRZEWANIA SILNIKA BLDC W ZALEŻNOŚCI OD SPOSOBU ZASILANIA

### COMPARISON OF BLDC MOTOR HEATING DEPENDING ON SUPPLY METHOD

**Streszczenie:** Istnieją różne sposoby zasilania uzwojeń silnika BLDC, które różnią się sprawnością przetwarzania energii elektrycznej w energię mechaniczną. Ponadto należy zaznaczyć, że nie ma jednego sposobu sterowania, które byłoby najlepsze dla wszystkich warunków pracy. Na całkowitą sprawność układu przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną składają się straty energii w silniku i straty energii w układzie komutatora elektronicznego. Straty energii w silniku powodują wzrost temperatury jego elementów. Z tego względu postanowiono porównać przebiegi temperatury wewnątrz silnika dla różnych wariantów zasilania. Na potrzeby badań zbudowano rejestrator temperatury wewnątrz silnika pracującego z zadaniem obciążeniem i zadaną prędkością wirowania.

**Abstract:** There are different ways of supplying BLDC motor. These methods differ in efficiency of energy transformation (from electrical energy into mechanical energy). It must be noted that there does not exist a single control method, which would answer the demands of all operating conditions. The total efficiency of system transforming electrical energy into mechanical energy is the sum of energy losses in the motor and in electronic commutator. The energy losses in the motor cause temperature rises in motor elements. That is why it has been decided to compare temperature curves for different motor elements and different supply variants. Temperature recorder dedicated to this end has been designed and built for motor operating at a given load and rotational speed.

**Słowa kluczowe:** silnik bezszczotkowy, komutator elektroniczny, przetwornica elektroniczna, sterowanie mikroprocesorowe

**Keywords:** — brushless motor, electronic commutator, electronic inverter, microprocessor controlling

### 1. Wstęp

Istnieją różne sposoby zasilania uzwojeń silnika BLDC, które różnią się sprawnością przetwarzania energii elektrycznej w energię mechaniczną. Ponadto należy zaznaczyć, że nie ma jednego sposobu sterowania, który byłby najlepszy dla wszystkich warunków pracy. Na całkowitą sprawność układu przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną składają się straty energii w silniku i straty energii w układzie komutatora elektronicznego. Straty energii w silniku powodują wzrost temperatury jego elementów. Z tego względu postanowiono porównać przebiegi temperatury wewnątrz silnika dla różnych wariantów zasilania. Na potrzeby badań zbudowano rejestrator temperatury wewnątrz silnika pracującego z zadaniem obciążeniem i zadaną prędkością wirowania.

### 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zostało zbudowane w taki sposób, aby możliwe było porównanie procesu nagrzewania silnika BLDC pracującego

w różnych układach zasilania przy zadanych ustalonych wartościach momentu obciążenia oraz prędkości wirowania i stałym poziomie napięcia baterii akumulatorów. Stanowisko badawcze składa się z dwóch zasadniczych części:

- układu napędowego wraz z układem zasilania i układem obciążenia,
- układu pomiarowego wyposażonego w funkcję zapisu danych i wizualizacji przebiegu nagrzewania.

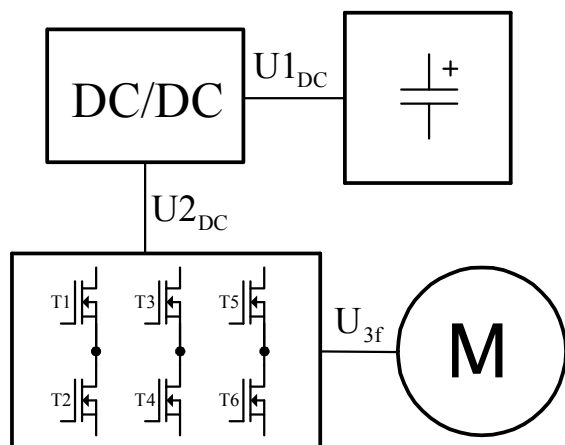
#### 2.1. Budowa układu napędowego

Konstruując układ zasilania silnika BLDC należy mieć na uwadze, że układ napędowy pojazdu musi pozwalać na regulację prędkości w szerokim zakresie, co jest możliwe poprzez zmianę wartości średniej napięcia podawanego na uzwojenia silnika. Cel ten można osiągnąć w dwojaki sposób:

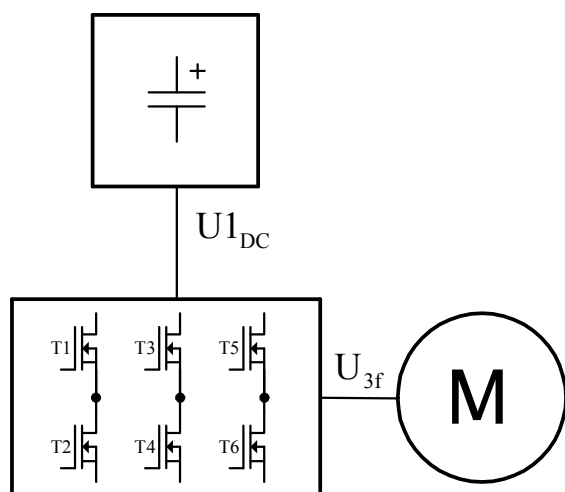
- regulując napięcie pobierane z akumulatora poprzez niezależny od komutatora układ energoelektryczny, komutator jest wysterowany

wówczas tylko i wyłącznie w zależności od położenia wału silnika,

- zmieniając współczynnik wypełnienia impulsów (PWM) tranzystorów komutatora elektronicznegoysterowanych w zależności od położenia wału silnika.



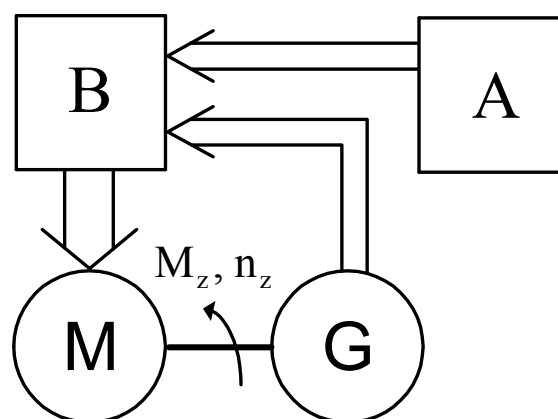
Rys. 1. Ogólna koncepcja budowy układu zasilania silnika BLDC – wariant pierwszy, układ z dodatkową przetwornicą DC/DC



Rys. 2. Ogólna koncepcja budowy układu zasilania silnika BLDC – wariant drugi, układ bez przetwornicy DC/DC

Zaletą wariantu drugiego (oznaczanego dalej 6tr) jest mniejsza liczba podzespołów mocy użytych do jego budowy. Wadą natomiast jest podawanie na uzwojenia silnika napięcia o różnym współczynniku wypełnienia (w zakresie niższych prędkości), co nie występuje w przypadku zasilania wg wariantu pierwszego. W przypadku wariantu pierwszego (oznaczonego DC/DC) regulacja napięcia odbywa się poprzez regulację PWM w przetwornicy DC/DC, na wyjściu której uzyskuje się napięcie odfiltrowane. Zastosowanie dodatkowej prze-

twornicy DC/DC powoduje oczywiście dodatkowe straty, które nie występują w wariantcie drugim, ale dzięki zasilaniu silnika napięciem odfiltrowanym straty powstające w silniku powinny być mniejsze niż w przypadku wariantu drugiego. Stąd nasuwa się pomysł przebadania procesu nagrzewania silnika dla obu układów zasilania i różnych stanów pracy. Porównanie procesu nagrzewania silnika pracującego w różnych układach zasilania wymaga zapewnienia powtarzalnych warunków zasilania (napięcie baterii akumulatorów) i obciążenia (moment obciążenia i prędkość wirowania) [1]. Na Rys. 3 przedstawiono schemat budowy układu napędowego.



Rys. 3. Schemat koncepcyjny stanowiska badawczego, gdzie M. - badany silnik wraz z układem zasilania, G - maszyna obciążająca, B - bateria akumulatorów, A - agregat prądowórczy lub zasilacz,  $n_z$  – zadana prędkość,  $M_z$  – zadany moment

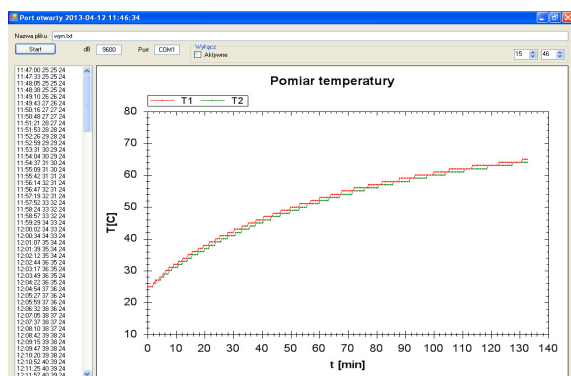
## 2.2. Budowa układu pomiarowego

Badany silnik na etapie produkcji został wyposażony w dwa czujniki temperatury zamontowane w żłobkach stojana. Dzięki temu istnieje możliwość pomiaru temperatury wewnątrz silnika. Na potrzeby badań zdemontowany został wentylator w celu lepszej możliwości porównania zmian temperatury wewnątrz silnika. Na potrzeby badań zbudowano w oparciu o mikroprocesor układ pomiaru temperatury współpracujący z trzema czujnikami, z których dwa to czujniki zabudowane wewnątrz silnika, a trzeci służy do pomiaru temperatury otoczenia. Układ pomiaru temperatury przesyła informacje o zmierzonej temperaturze do rejestratora poprzez port szeregowy. Realizacja rejestratora pomiarowego została przedstawiona na zdjęciu (Rys. 4).



Rys. 4. Rejestrator temperatury zbudowany w oparciu o płytę główną miniPC z zaznaczonym układem pomiaru temperatur

Rejestrator zbudowany został w oparciu o sprzęt miniPC, wyposażony w stworzony na potrzeby badań program komputerowy (zrzut ekranu zamieszczono na Rys. 5) służący do rejestracji oraz wizualizacji otrzymanych wyników pomiaru. Zarejestrowane dane zapisywane są w pliku tekstowym, w którym w kolejnych liniach zapisywane są: czas rejestracji oraz odczyt temperatury na poszczególnych czujnikach, co wizualizuje również interfejs graficzny aplikacji rejestratora.



Rys. 5. Zrzut ekranu rejestratora temperatury w trakcie pomiarów

### 3. Pomiar

Wykorzystując przedstawione powyżej stanowisko badawcze oraz stworzoną aparaturę badawczą przeprowadzono pomiary i rejestracje temperatury silnika BLDC dla dwóch wariantów zasilania i czterech stanów pracy:

- $M=1/3M_N$  i  $n=1/3n_N$ ,
- $M=1/2M_N$  i  $n=1/3n_N$ ,
- $M=1/2M_N$  i  $n=1/2n_N$ ,
- $M=M_N$  i  $n=1/2n_N$ ,

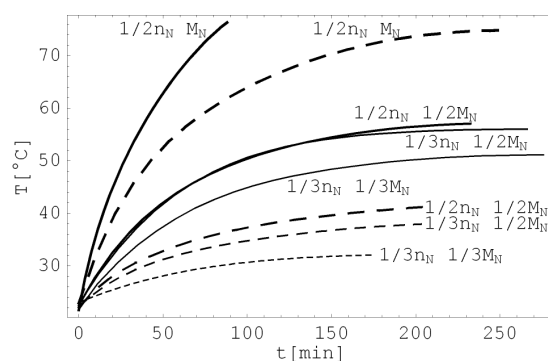
W Tabeli 1 przedstawiono zarejestrowane maksymalne temperatury, do których nagrzał się silnik pracujący w określonych powyżej stanach pracy przy różnych wariantach zasilania. Przez  $\Delta$  oznaczono przyrost temperatury silnika od temperatury otoczenia do temperatury ustalonej w danych warunkach pracy. Natomiast przez  $\delta$  oznaczono względną procentową różnicę pomiędzy przyrostem temperatury dla wariantu 6tr względem wariantu DC/DC

$$\delta = 100 \frac{\Delta^{6tr} - \Delta^{DC/DC}}{\Delta^{DC/DC}} \%$$

Tabela 1. Zestawienie maksymalnych temperatur silnika zarejestrowanych podczas pracy

M	$1/3 M_N$	$1/2 M_N$	$1/2 M_N$	$M_N$
n	$1/3 n_N$	$1/3 n_N$	$1/2 n_N$	$1/2 n_N$
DC/DC	32 °C	38 °C	41 °C	75 °C
$\Delta^{DC}$	10 °C	16 °C	19 °C	53 °C
6tr	51 °C	56 °C	57 °C	-
$\Delta^{6tr}$	29 °C	34 °C	35 °C	-
$\Delta^{6tr} - \Delta^{DC}$	19 °C	18 °C	16 °C	-
$\delta$ [%]	190	112.5	84.2	-

Ponadto na Rys. 6 zestawiono przebiegi zarejestrowanych temperatur silnika podczas pracy w określonych warunkach pracy dla dwóch wariantów zasilania. Badania były prowadzone do czasu, gdy temperatura silnika ustaliła się, bądź gdy temperatura silnika osiągnęła wartość 76 °C ze względu na ochronę magnesów trwałych przed utratą właściwości magnetycznych. Liniami przerywanymi zaznaczono przebiegi dla wariantu DC/DC, a liniami ciągłymi dla wariantu 6tr.



Rys. 6. Zestawienie przebiegów temperatur nagrzewania silnika w określonych stanach pracy dla dwóch wariantów zasilania: linia ciągła dla wariantu 6tr, linia przerywana dla wariantu DC/DC

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania nagrzewania silnika BLDC w określonych stanach pracy pokazują, że przyrosty temperatury nie tylko zależą od stanu pracy silnika, ale również od wariantu układu zasilania. Dla każdego z badanych stanów pracy mniejsze przyrosty temperatury zarejestrowano dla wariantu DC/DC. W przypadku stanu pracy z momentem znamionowym dla wariantu 6tr nagrzewanie zostało przerwane przed ustaleniem się temperatury silnika, co nie miało miejsca w przypadku wariantu DC/DC. Cechą pracy silnika z układem zasilania wyposażonym w przetwornicę DC/DC są niewielkie przyrosty temperatur podczas pracy przy niewielkich obciążeniach (do  $1/2M_N$ ), co pozwala na krótkotrwałe przeciążanie silnika bez niebezpieczeństwa jego przegrzania. Krótkotrwałe przeciążanie silnika jest wykorzystywane podczas rozruchu pojazdów trakcyjnych, przez co do napędu pojazdów przeznaczonych do ruchu miejskiego (duża zmienność obciążenia z przewagą niewielkiego obciążenia) korzystniejsze jest zastosowanie układu zasilania z przetwornicą DC/DC.

#### 5. Literatura

- [1]. Sikora A., Zielonka A.: Stanowisko do badania silnika BLDC z możliwością zadania prędkości i momentu obciążenia. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66 Studia i Materiały Nr 32, 2012r. ISSN 1733-0718, str. 291-297.
- [2]. Sikora A., Zielonka A., Kulesz B.: Efficiency of BLDC motor drive. XXII Symposium EPNC Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, Pula (Croatia) 26-29.06.2012r. str. 95-96.
- [3]. Zgłoszenie patentowe P-394971 z dn. 23.05.2011 Twórcy: Andrzej Sikora, Adam Zielonka Tytuł: „Układ zasilania silnika BLDC”.
- [4]. Sikora A., Zielonka A.: Ograniczenie strat mocy w silniku BLDC wynikających z pulsacji prądu zasilania. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. Nr 90/2011 PEMINE KOMEL, Ryto, maj 2010r. ISSN 0239-3646, str. 205-212.
- [5]. Fręchowicz A.: Electric braking in BLDC motors with windings partially and electronically shunted. Referat na 20th International Conference on Electrical Machines ICEM 2012, 2 – 5 września 2012, Marsylia, Francja.
- [6]. Sikora A., Zielonka A.: Wpływ położenia czujników hallotronowych na symetrię sygnałów sterujących silnikiem BLDC. Pojazdy Szybowe 3/2011r. ISSN 0138-0370 str. 30 – 36.

[7]. Sikora A., Zielonka A.: Dwa warianty zasilania silnika BLDC. Wiadomości Elektrotechniczne 6/2011r. ISSN 0043-5112 str. 18 - 19.

[8]. Fręchowicz A.: Własności dynamiczne bezszczotkowych silników prądu stałego, zastosowanych w czterokwadrantowych napędach wózka inwalidzkiego. IX międzynarodowa konferencja: "MET'2009 – Modern Electric Traction", Gdańsk, September 2009, str 49 – 54.

#### 6. Autorzy

dr inż. Andrzej Sikora

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki, Zakład Inżynierii Elektrycznej w Transporcie ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, tel. (32)2371258, Andrzej.Sikora@polsl.pl

dr inż. Adam Zielonka

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Matematyki Stosowanej, Instytut Matematyki, Zakład Zastosowań Matematyki, ul. Kaszubska 23, 44-100 Gliwice, Adam.Zielonka@polsl.pl

dr inż. Tomasz Rudnicki

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Tomasz.Rudnicki@polsl.pl

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy Nr N N510 077638.