

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI I ELEKTROTECHNIKI
INSTYTUT ROBOTYKI I INTELIGENCJI MASZYNOWEJ
ZAKŁAD STEROWANIA I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ



PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA

Mikroprocesorowy kaskadowy układ regulacji prądu, prędkości i
położenia dla napędu z silnikiem BLDC

PROMOTOR:
DR INŻ. DOMINIK ŁUCZAK
POTWIERDZAM PRZYJĘCIE PRACY

.....
DATA I PODPIS PROMOTORA

MATEUSZ SEMKŁO

2020-10-25

Spis treści

1	Wstęp	3
2	Silnik BLDC	4
2.1	Budowa silnika BLDC	4
2.2	Zasada działania silnika BLDC	5
2.3	Sposoby sterowania	5
2.4	Model matematyczny	6
2.5	Wady i zalety	7
3	Field Orient Control	7
4	Wnioski	7
	Wykaz ilustracji	7

1 Wstęp

W ramach pracy inżynierskiej został zbudowany układ napędowy z regulacją prądu, prędkości i kąta obrotu wirnika dla silnika BLDC (ang. *BrushLess Direct-Current motor*) . Głównym założeniem jest pokazanie możliwości wykorzystania mikroprocesora jako jednego ze sposobów na realizację układu sterowania.

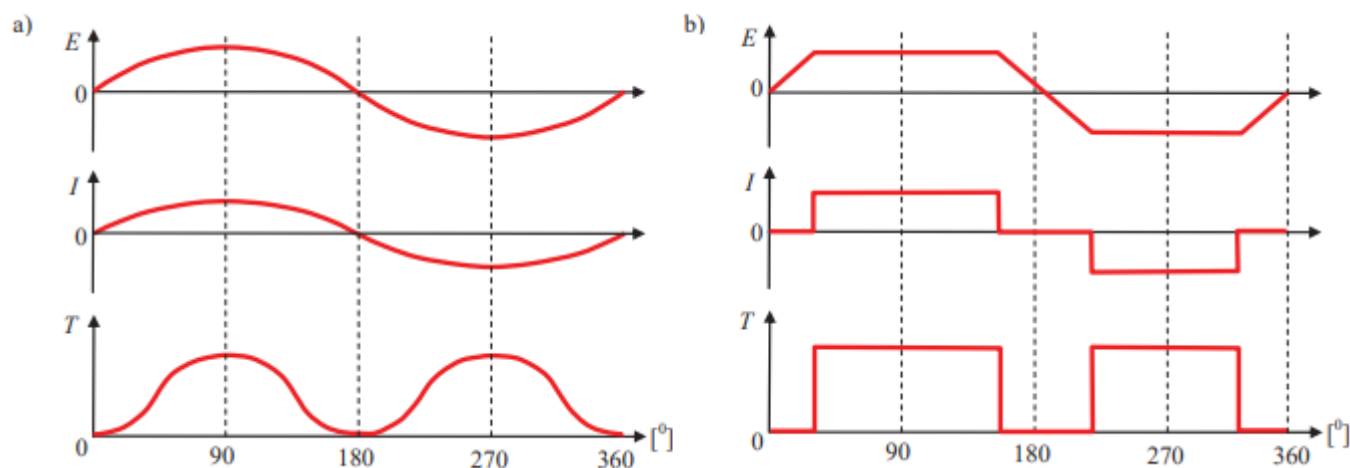
Zbudowany prototyp wykorzystuje rdzeń ARM Cortex-M4 jako główną jednostkę obliczeniową i odpowiedzialny jest za proces regulacji. Procesor wbudowany w płytę prototypową B G431B-ESC1 firmy STMicroelectronics posiada wszystkie wymagane peryferia. Sterownik B G431B ESC1 za pomocą łącza szeregowego UART sprzężony został z mikrokontrolerem NUCLEO-F746ZG firmy STMicroelectronics wyposażonym w rdzeń ARM Cortex-M7. Odpowiedzialny jest za komunikację poprzez Ethernet i protokół TCP/IP z interfejsem użytkownika oraz równolegle ze sterownikiem pobiera informacje z czujników. Rozwiązanie to umożliwia wykorzystanie mocy obliczeniowej tylko do procesu regulacji. Silnik BLDC należy do rodziny silników synchronicznych z magnesami trwałymi. W związku z ich właściwościami oraz coraz częstszym wykorzystywaniu w automatyce i robotyce stał się obiektem, na podstawie którego przeprowadzono badania opisane w niniejszej pracy. Silnik ze względu na konstrukcję wymaga bardziej złożonego sposobu sterowania w porównaniu z silnikiem prądu stałego. FOC (ang. Field-orient control) jest jedną z technik sterowania silnikiem trójfazowym. Pozwala ona sprowadzić parametry silnika z trójwymiarowego układu współrzędnych do wirującego układu o dwóch współrzędnych zgodnych z wektorem strumienia wirnika i sterować trójfazowym silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych w taki sam sposób jak silnikiem prądu stałego.

Kolejne rozdziały opisują sposób, schematy, etapy działań i wyniki obliczeń zbudowanego prototypu układu napędowego dla silnika BLDC.

2 Silnik BLDC

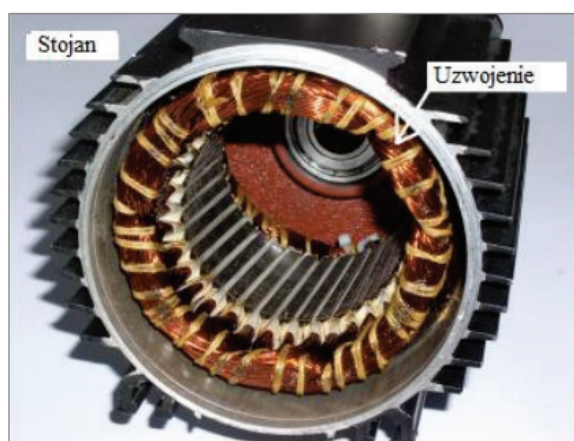
2.1 Budowa silnika BLDC

Bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi można podzielić na silniki prądu stałego BLDC (ang. BrushLess Direct-Current motor) oraz synchroniczne silniki prądu przemiennego PMSM (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor). Różnią się one kształtem przebiegu siły elektromotorycznej. W silniku BLDC przyjmuje kształt trapezoidalny a silnik PMSM sinusoidalny [2].

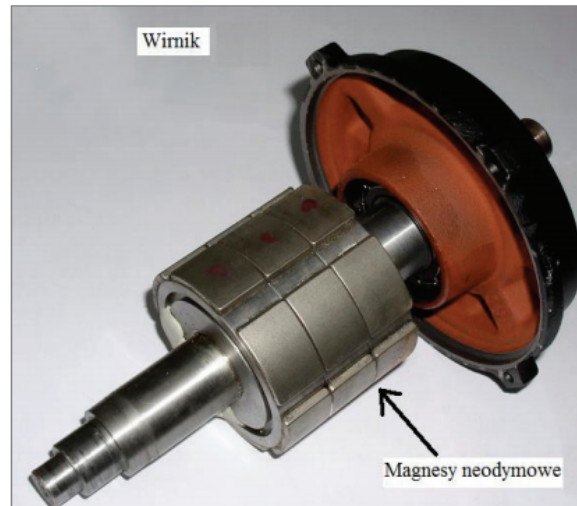


Rysunek 1: Przebiegi siły elektromotorycznej E , prądu I i momentu T dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [4]

Istnieje wiele odmian silników BLDC różniących się budową, konstrukcją obwodów magnetycznych, rozkładem indukcji i kształtem sił elektromotorycznych. Uzwojenie twornika jest zazwyczaj w stojanie i jest uzwojeniem trójfazowym. Kształt magnesów, trwale umieszczonych na wirniku zapewniają stałą wartość indukcji w szczelinie maszyny i trapezoidalny kształt siły elektromotorycznej[3].



Rysunek 2: Stojan silnika BLDC [2]

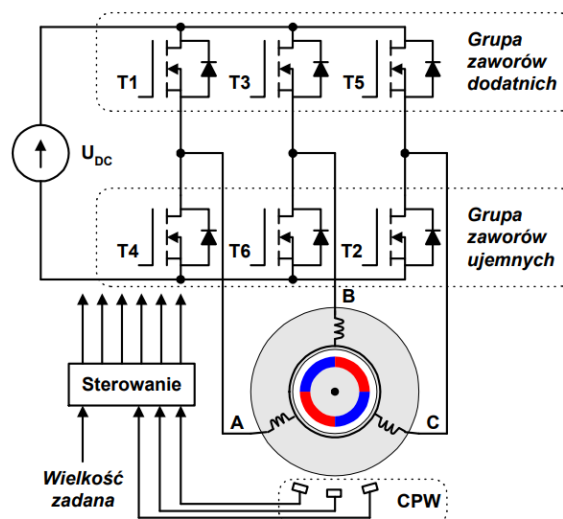


Rysunek 3: Wirnik silnika BLDC [2]

2.2 Zasada działania silnika BLDC

Silnik elektryczny przetwarza dostarczoną energię elektryczną w energię mechaniczną. Ruch wirnika występuje, gdy zasilając odpowiednie uzwojenia stojana następuje pojawienie się wirującego pola elektromagnetycznego, które oddziałuje na pole magnetyczne wirnika i wprawia go w ruch. Strumienie magnetyczne wirnika i stojana powinny być względem siebie nieruchome. W klasycznym silniku prądu stałego powyższy warunek jest spełniony przez odpowiednie umiejscowienie szczotek komutatora względem pola stojana. Z powodu braku klasycznego komutatora w silniku BLDC zapewnienie wirowania strumienia stojana synchronicznie z wirnikiem jest realizowane przez odpowiednie przełączanie uzwojeń. W tym celu wykorzystuje się przetwornik energoelektroniczny, którego zadaniem jest odpowiednie usytuowanie strumieni względem siebie, poprzez przełączanie tranzystorami mocy. Aby to zrealizować potrzebna jest wiedza o aktualnym położeniu kąta obrotu wirnika, wykorzystując czujniki Halla lub przetworniki obrotowo-impulsowe[3].

Na rysunku 4 pokazano uproszczony schemat układu sterowania i zasilania silnika BLDC.



Rysunek 4: uproszczony schemat układu sterowania i zasilania silnika BLDC [1]

2.3 Sposoby sterowania

Silnik bezszczotkowy nie posiada konwencjonalnego komutatora, więc stale należy kontrolować położenie wirnika oraz zastosować odpowiedni sposób załączania uzwojeń. Istnieją trzy podstawowe strategie

komutacji:[2]

- komutacja trapezoidalna – przełączanie uzwojeń odbywa się w sposób dyskretny więc nie jest potrzebny ciągły pomiar kąta obrotu wału. Najczęściej wykorzystuje się czujniki Halla, które są rozmieszczone w odstępach 120 stopni lub bezczujnikowe obliczanie położenia wirnika. Zmiana stanu jednego z czujników inicjuje rozpoczęcie zmiany zasilania uzwojeń stojana. Zasilane są jednocześnie tylko dwa uzwojenia.[1]
- komutacja sinusoidalna – przełączanie uzwojeń odbywa się w sposób quasi-ciągły. Prądy fazowe i siły elektromotoryczne powinny być sinusoidalne. Przekształtnik energoelektroniczny pełni funkcję falownika. Do pomiaru położenia wykorzystuje się przetwornik impulsowo-obrotowy lub algorytm do bezczujnikowego obliczania kąta obrotu wirnika. Zasilane są jednocześnie trzy uzwojenia. [1]
- zastosowanie algorytmu FOC (ang. Field Orient Control).
Metoda ta została wykorzystana w niniejszej pracy i opisana w rozdziale 3.

2.4 Model matematyczny

Wartość momentu elektromagnetycznego wytworzonego dla płaskiego fragmentu siły elektromotorycznej przez prąd płynący w jednym uzwojeniu fazowym [3]:

$$M_e = p\psi_p i \quad (1)$$

M_e - moment elektromagnetyczny

p - liczba par biegunów

ψ_p -strumień magnetyczny wytworzony przez wirnik a skojarzony z uzwojeniem stojana

i - prąd uzwojenia stojana

Chwilowa wartość strumienia skojarzonego z k -tym uzwojeniem zmieniająca się w funkcji obrotu wirnika [3]:

$$\psi_k(\theta_e) = \psi_p f(\theta_e) \quad (2)$$

θ_e - elektryczny kąt położenia wirnika

Łącząc powyższe Wyrażenia 1 i 2 uzyskujemy moment elektromagnetyczny dla k -tej fazy [3]:

$$M_{ek} = p\psi_k(\theta_e) i \quad (3)$$

Wzór dla płaskiego odcinka siły elektromotorycznej[3]:

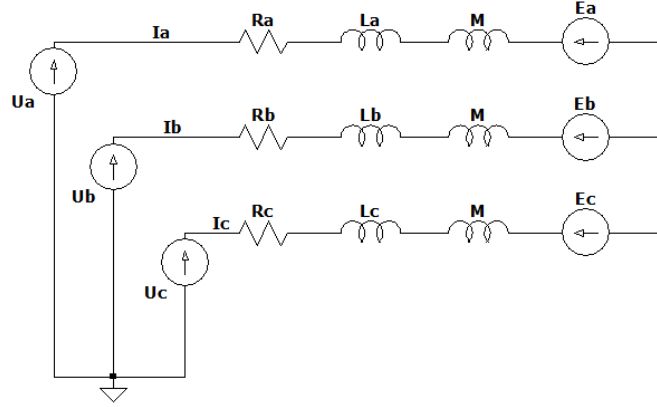
$$E_p = p\psi_p \omega \quad (4)$$

ω - prędkość obrotowa wirnika

Wyrażenie opisujące siłę elektromotoryczną indukowaną w k -tym uzwojeniu[3]:

$$E_k = p\psi_k(\theta_e) \omega \quad (5)$$

Silnik BLDC można traktować jako szczególny przypadek silnika synchronicznego. Schemat silnika trójfazowego z magnesami trwałymi przedstawiony na rysunku 5.



Rysunek 5: Schemat silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

M - indukcyjność wzajemna
L - indukcyjność własna
R - rezystancja uzwojeń
E - siła elektromotoryczna

Zakładając, że indukcyjności własne i rezystancje są równe:

$$L = L_A = L_B = L_C R = R_A = R_B = R_C \quad (6)$$

oraz indukcyjności wzajemne również to całkowita indukcyjność jednej fazy jest równa:

$$L_S = L - M \quad (7)$$

Otrzymujemy wyrażenie [3]:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + L_S \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

oraz

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

Wykorzystując równanie 9, 5, 3 i zapis na w postaci równań stanu 10 uzyska się pełen model idealnego silnika o trapezoidalnej sile elektromotorycznej [3]:

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Bu \quad (10)$$

2.5 Wady i zalety

3 Field Orient Control

4 Wnioski

Spis rysunków

1	Przebiegi siły elektromotorycznej E, prądu I i momentu T dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [4]	4
2	Stojan silnika BLDC [2]	4
3	Wirnik silnika BLDC [2]	5
4	uproszczony schemat układu sterowania i zasilania silnika BLDC [1]	5
5	Schemat silnika synchronicznego z magnesami trwałymi	7

Literatura

- [1] Arkadiusz Domoracki and Krzysztof Krykowski. Silniki bldc-klasyczne metody sterowania. *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, 72, 2005.
- [2] Zbigniew Goryca. Metody sterowania silników bldc. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, (66):32–47, 2012.
- [3] Krzysztof Krykowski. *Silniki PM BLDC*. Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2015.
- [4] Konrad Zajkowski and Stanisław Duer. Sterowanie prędkością obrotową silnika bezszczotkowego bldc. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 14:303–306, 2013.