

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	8
3	Field Orient Control	8
4	SVPWM	10
5	Wnioski	11
	Wykaz ilustracji	11

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.

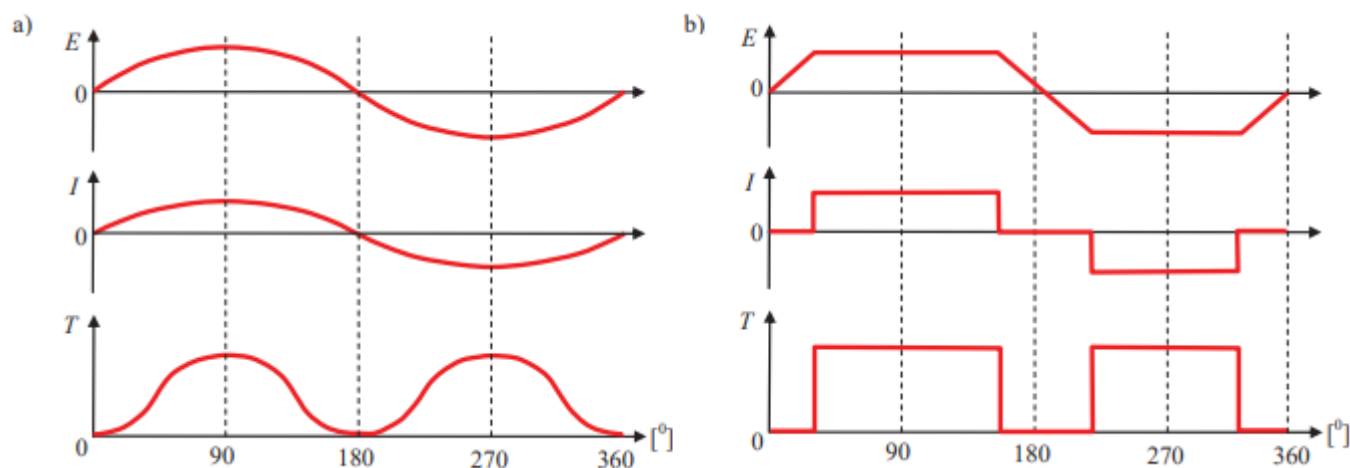
Zbudowany prototyp wykorzystuje rdzeń ARM Cortex-M4 jako główną jednostkę obliczeniową i odpowiedzialny jest za proces regulacji. Procesor wbudowany w płytę prototypową B G431B-ESC1 firmy STMicroelectronics posiada wszystkie wymagane peryferia. Sterownik B G431B ESC1 za pomocą łącza szeregowego UART 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

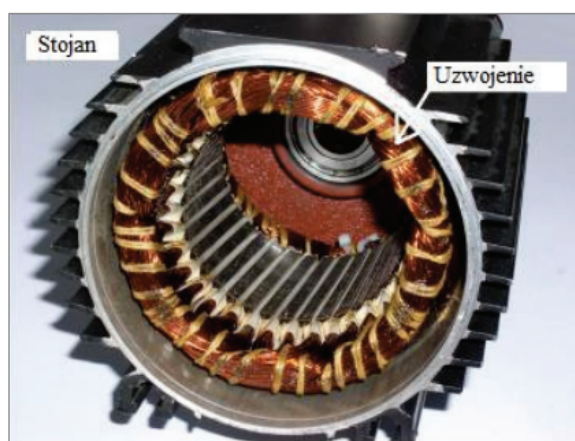
2.1 Budowa silnika BLDC

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 [4].

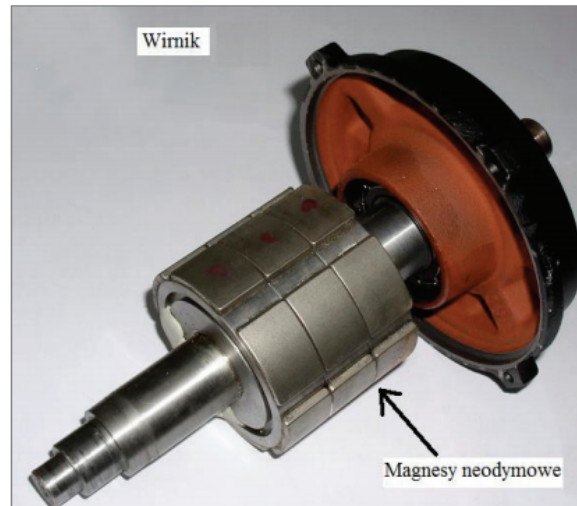


Rysunek 1: Przebiegi siły elektromotorycznej E , prądu I i momentu T dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [8]

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[5].



Rysunek 2: Stojan silnika BLDC [4]

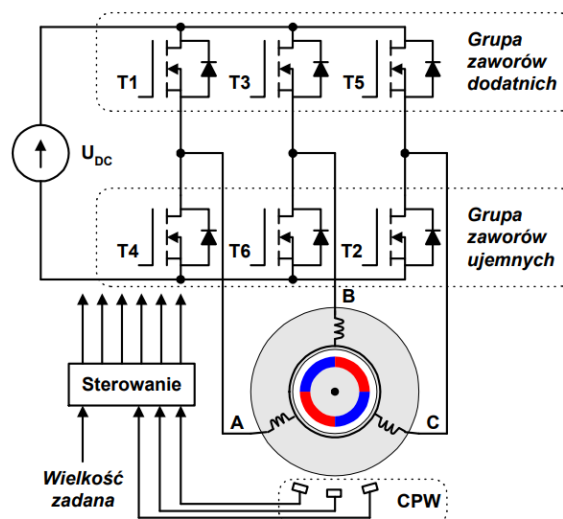


Rysunek 3: Wirnik silnika BLDC [4]

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[5].

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



Rysunek 4: Uproszczony schemat układu sterowania i zasilania silnika [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 [5]:

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

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 [5]:

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

θ_e - elektryczny kąt położenia wirnika

Łącząc powyższe Wyrażenia 1 i 2 uzyskujemy moment elektromagnetyczny dla k -tej fazy [5]:

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

Moment całkowity jest równy sumie momentów elektromagnetycznych[5]:

$$M_e = \sum_{k=1}^3 M_{ek} \quad (4)$$

Równanie ruchu ma postać:

$$M_e = J \frac{d\omega}{dt} + M \quad (5)$$

J - moment bezwładności

M - moment oporowy

Wzór dla płaskiego odcinka siły elektromotorycznej[5]:

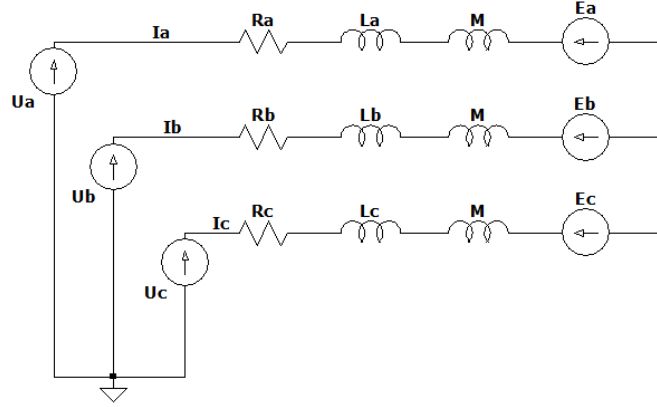
$$E_p = p\psi_p \omega \quad (6)$$

ω - prędkość obrotowa wirnika

Wyrażenie opisujące siłę elektromotoryczną indukowaną w k -tym uzwojeniu[5]:

$$E_k = p\psi_k(\theta_e) \omega \quad (7)$$

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:

$$L = L_A = L_B = L_C R = R_A = R_B = R_C \quad (8)$$

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

$$L_S = L - M \quad (9)$$

Otrzymujemy wyrażenie [5]:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + L_S \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

oraz

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

Wykorzystując równanie 5,11 , 7 , 3 i zapis na w postaci równań stanu 12 uzyska się pełen model idealnego silnika o trapezoidalnej sile elektromotorycznej [5]:

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Bu \quad (12)$$

gdzie:

$$x = [I_A \quad I_B \quad I_C \quad \omega \quad \theta]^T \quad (13)$$

$$u = [U_A \quad U_B \quad U_C \quad M]^T \quad (14)$$

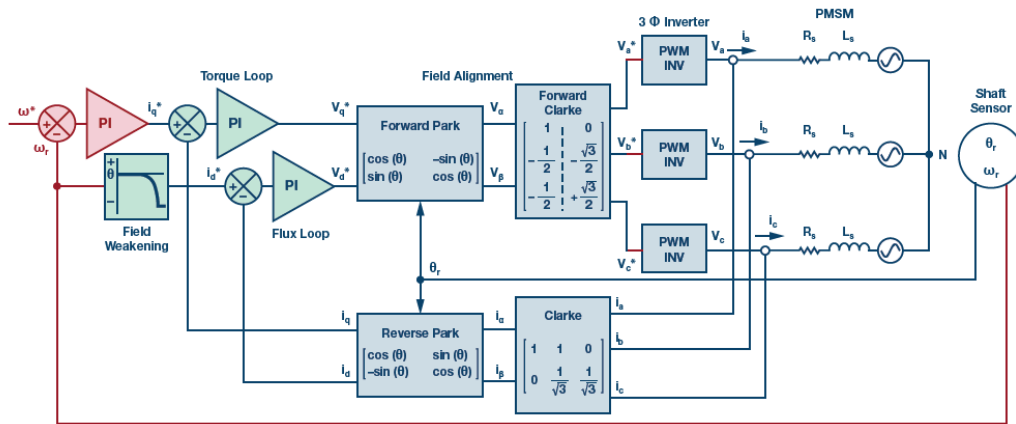
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -p\psi_A(\theta_e)/L & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -p\psi_B(\theta_e)/L & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & -p\psi_C(\theta_e)/L & 0 \\ -p\psi_A(\theta_e)/J & -p\psi_B(\theta_e)/J & -p\psi_C(\theta_e)/J & -B/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.5 Wady i zalety

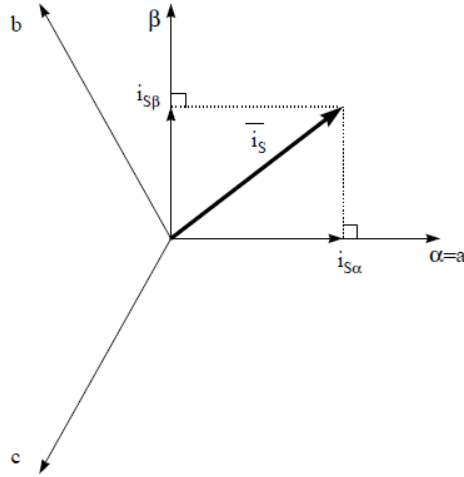
3 Field Orient Control

Algorytm wektorowy FOC (ang. Field Orient Control) przedstawiony schematycznie na rysunku 10 jest jedną z powszechnie stosowanych metod sterowania silników trójfazowych. Polega na bezpośrednim sterowaniu wirującym polem stojana[7]. Pozwala uzyskać dokładną i dynamiczną regulację prędkości i momentu w szerokim zakresie.



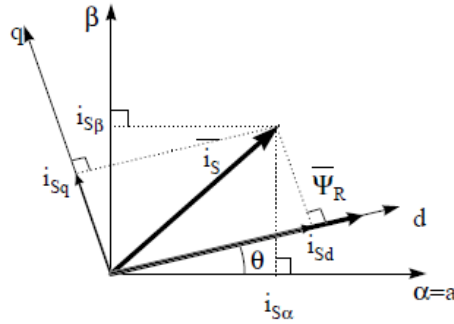
Rysunek 6: Algorytm FOC [3]

Metoda FOC steruje prądami fazowymi stojana reprezentowanymi w postaci wektora. Czujniki prądu dostarczają informację zwrotną o aktualnych prądach fazowych. Za pomocą transformaty Clark'a, wyrażona za pomocą wzoru 17 i pokazana na rysunku 7, przekształca się trójwymiarowy układ współrzędnych, w którym opisane są prądy fazowe Ia, Ib, Ic na układ ograniczony tylko do dwóch współrzędnych otrzymując wirujący wektor na płaszczyźnie. Znaając aktualne położenie wirnika i korzystając z transformaty Park'a, wyrażona we wzorze 18 i pokazana na rysunku 8, uzyskujemy wirujący układ współrzędnych. Operacja ta pozwala to na przekształcenie wirującego wektora prądu na dwie składowe stałe Id, Iq. Id jest wielkością odpowiadającą strumieniowi magnetycznemu a Iq momentowi obrotowemu silnika. Minimalizując wartość Id zapewniamy kąt prosty między polem magnetycznym stojana i wirnika oraz uzyskujemy największą sprawność silnika[7] [2].



Rysunek 7: Transformata Clark'a [2]

$$\begin{cases} I_\alpha = I_A \\ I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}I_A + \frac{2}{\sqrt{3}}I_B \end{cases} \quad (17)$$

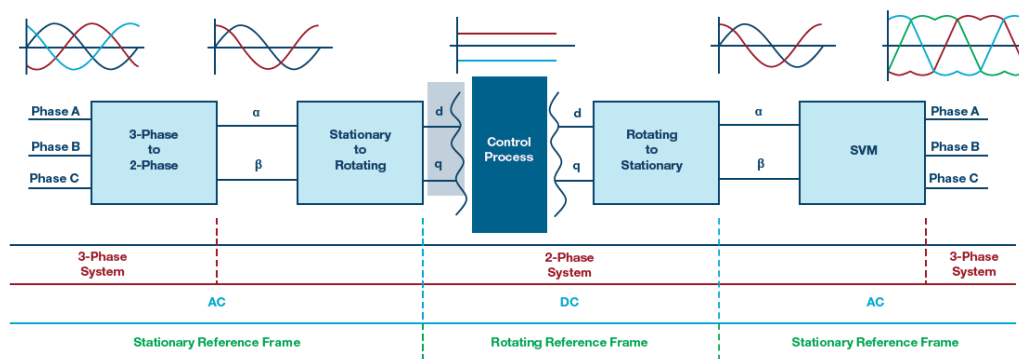


Rysunek 8: Transformata Clark'a [2]

$$\begin{cases} I_d = I_\alpha \cos(\theta) + I_\beta \sin(\theta) \\ I_q = I_\alpha \sin(\theta) + I_\beta \cos(\theta) \end{cases} \quad (18)$$

Algorytm FOC pozwala uzyskać z trzech przebiegów prądów przemiennych, dwie składowe stałoprądowe. Pozwala to na zastosowanie dwóch regulatorów PID dla składowej I_d oraz I_q uzyskując regulator prądu(momentu). Regulacje prędkości obrotowej i położenia wirnika można zrealizować przez dodanie kolejnych regulatorów PID do gałęzi ze stałą I_q .

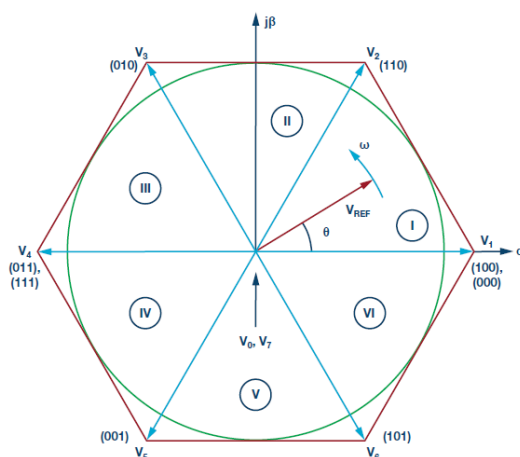
Zastosowanie odwrotnych transformat pozwala na sprowadzenie składowych stałych na trzy przebiegi sinusoidalne i wprowadzenie tych wartości na kolejny blok algorytmu FOC zwany SVPWM (ang. Space Vector Pulse Width Mudulation) opisany w rozdziale 4. Blok ten steruje bramkami tranzystorów przetwornika, aby uzyskać w uzwojeniach takie przebiegi prądów, które będą generowały odpowiednią amplitudę i prędkość wirowania pola magnetycznego stojana względem pola wirnika. Rysunek 9 przedstawia kolejność dokonywanych transformacji.



Rysunek 9: Transformacje w algorytmie FOC [3]

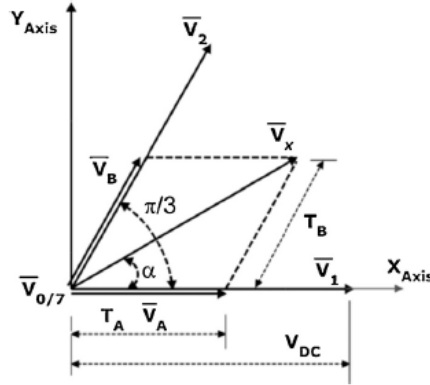
4 SVPWM

Wydajność prądowa mikrokontrolera jest niewystarczająca aby zasilić silnik, dlatego uzwojenia stojana są bezpośrednio podłączone do przekształtnika energoelektronicznego. Na rysunku 4 przedstawiony jest uproszczony schemat. Zasilany jest on napięciem stałym. Elementami wykonawczymi są tranzystory mocy. W przekształtniku trójfazowym jest grupa trzech zaworów dodatnich i ujemnych. W każdej chwili aktywne są trzy zawory. W ten sposób uzyskujemy osiem możliwych kombinacji załączeń tranzystorów, które generują osiem wektorów i dzielą przestrzeń na sześć sektorów. Schemat przedstawiony na rysunku 10



Rysunek 10: Wektory w przestrzeni stanu i podział na sektory [3]

Na przykładzie rysunku 11 objaśniony zostanie sposób generowania dowolnego wektora według metody SVPWM. Wektor V_x znajduje się w sektorze pierwszym i jest wynikiem dodania do siebie trzech wektorów V_a , V_b i V_o , gdzie V_o jest wektorem zerowym:



Rysunek 11: Generowanie wektora V_x [6]

Dla sektora pierwszego wektor V_a jest zgodny z kierunkiem wektora V_1 a wektor V_b z kierunkiem wektora V_2 . Długość obu wektorów jest determinowana przez czas, w którym dana sekwencja zaworów (reprezentowana przez określony wektor V_1, \dots, V_6) jest aktywna. Z wyrażenia X można wyznaczyć czasy, które są potrzebne, aby wygenerować dany wektor:

Suma czasów potrzebnych do wygenerowania wektorów V_a , V_b i wektora zerowego jest równa okresowi modulacji szerokości impulsów.

5 Wnioski

Spis rysunków

1	Przebiegi siły elektromotorycznej E , prądu I i momentu T dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [8]	4
2	Stojan silnika BLDC [4]	4
3	Wirnik silnika BLDC [4]	5
4	Uproszczony schemat układu sterowania i zasilania silnika [1]	5
5	Schemat silnika synchronicznego z magnesami trwałymi	7
6	Algorytm FOC [3]	8
7	Transformata Clark'a [2]	9
8	Transformata Clark'a [2]	9
9	Transformacje w algorytmie FOC [3]	10
10	Wektory w przestrzeni stanu i podział na sektory [3]	10
11	Generowanie wektora V_x [6]	11

Literatura

- [1] Arkadiusz Domoracki and Krzysztof Krykowski. Silniki bldc-klasyczne metody sterowania. *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, 72, 2005.
- [2] Texas Instruments Europe. Field orientated control of 3-phase ac-motors. *Literature Number: BPRA073*, 1998.
- [3] Charles Frick. Brushless dc motors introduction for next-generation missile actuation systems outline. *Analog Devices, Inc.*, 6, 2018.
- [4] Zbigniew Goryca. Metody sterowania silników bldc. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, (66):32–47, 2012.
- [5] Krzysztof Krykowski. *Silniki PM BLDC*. Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2015.
- [6] Ahmed A Mansour. Novel svpwm based on first order equation. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2(2):197–206, 2015.

- [7] Jacek Przepiorkowski. Trojfazowy falownik wektorowy zestaw ewaluacyjny tms320f28035 podstawy teoretyczne. *SKLEP.AVT.PL ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA*, 4, 2010.
- [8] Konrad Zajkowski and Stanisław Duer. Sterowanie prędkością obrotową silnika bezszczotkowego bldc. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 14:303–306, 2013.