

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	4
2.2	Zasada działania	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	Układ napędowy z silnikiem BLDC	11
5.1	Spis urządzeń	11
5.2	Dane techniczne i opis urządzeń	12
6	Wnioski	14
	Wykaz ilustracji	14

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.

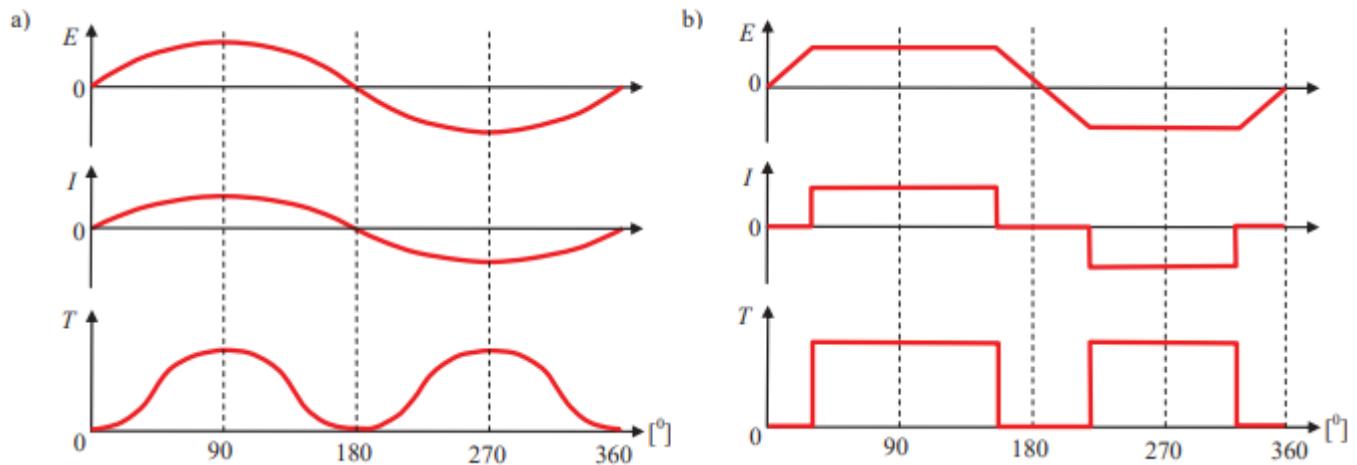
Zbudowany prototyp wykorzystuje rdzeń ARM Cortex-M4 jako główną jednostkę obliczeniową i odpowiedzialny jest za proces regulacji. Procesor wbudowany w płytę prototypową B G431B-ESC1 firmy STMicroelectronics posiada wszystkie wymagane peryferia. Sterownik B G431B ESC1 za pomocą łącza szeregowego UART sprzężony został z mikrokontrolerem NUCLEO-F746ZG firmy STMicroelectronics wyposażonym w rdzeń ARM Cortex-M7. Odpowiedzialny jest za komunikacje poprzez Ethernet i protokół TCP/IP z interfejsem użytkownika oraz równolegle ze sterownikiem pobiera informacje z czujników. Rozwiążanie 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 automatyczce 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 układ 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

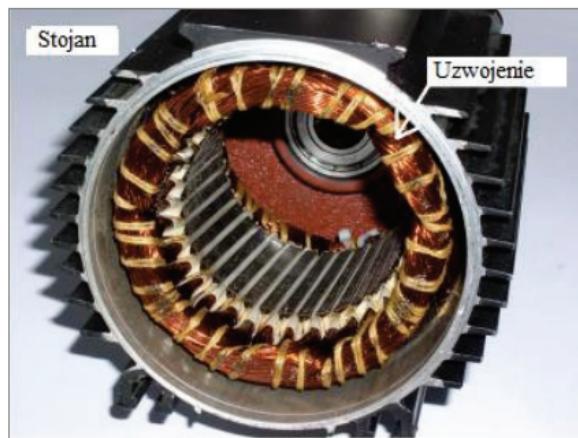
2.1 Budowa

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 [11]

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, trwałe umieszczoneń na wirniku zapewniają stałą wartość indukcji w szczeelinie maszyny i trapezoidalny kształt siły elektromotorycznej[5].



Rysunek 2: Stojan silnika BLDC [4]

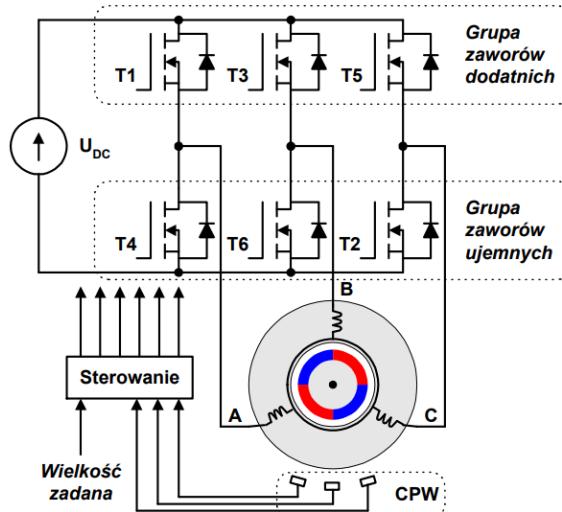


Rysunek 3: Wirnik silnika BLDC [4]

2.2 Zasada działania

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 rozмещенные в отступах 120 градусов и используются для определения положения якоря. Изменение состояния одного из чувствительных элементов запускает начало изменения напряжения статора. Применяются одновременно только две обмотки.[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 biegunków

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]:

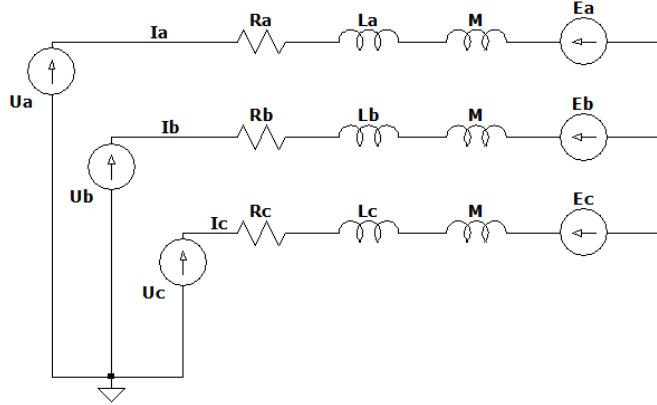
$$E_p = p\psi_p \omega \quad (6)$$

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 własne

R - rezystancja uzwojeń

E - siła elektromotoryczna

Zakładając, że indukcyjności własne i rezystancje są równe:

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

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]:

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

gdzie:

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

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

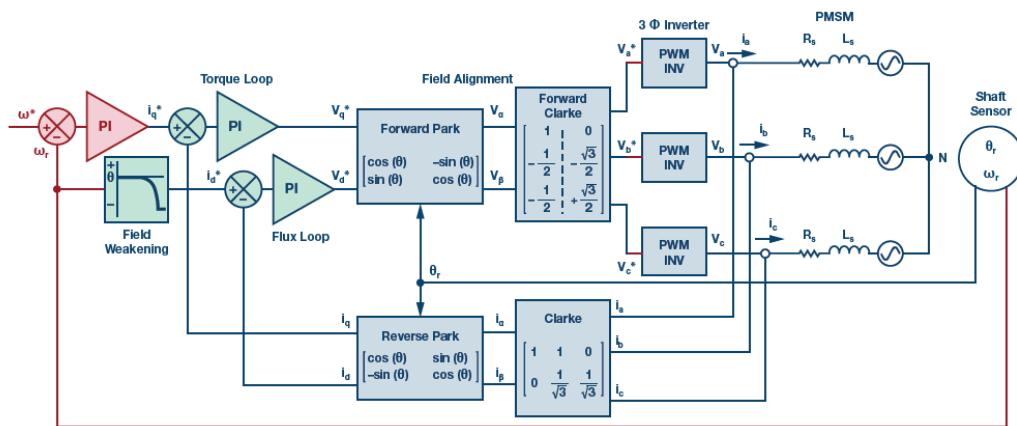
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -p\psi_A(\theta_e)/L & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -p\psi_B(\theta_e)/L & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & -p\psi_C(\theta_e)/L & 0 \\ -p\psi_A(\theta_e)/J & -p\psi_B(\theta_e)/J & -p\psi_C(\theta_e)/J & -B/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

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

2.5 Wady i zalety

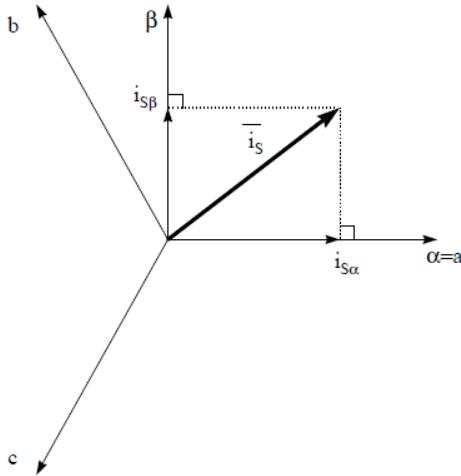
3 Field Orient Control

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.



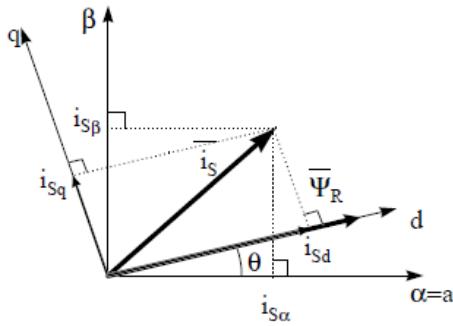
Rysunek 6: Algorytm FOC [3]

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 trójwymiarowy układ współrzędnych, w którym opisane są prądy fazowe I_a, I_b, I_c na układ ograniczony tylko do dwóch współrzędnych otrzymując wirujący wektor na płaszczyźnie. Znając 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 na przekształcenie wirującego wektora prądu na dwie składowe stałe I_d, I_q . I_d jest wielkością odpowiadającą strumieniowi magnetycznemu a I_q momentowi elektromagnetycznemu silnika. Minimalizując wartość I_d zapewniamy kąt prosty między polem magnetycznym stojana i wirnika oraz uzyskujemy największą sprawność silnika[7] [2].



Rysunek 7: Transformata Clark'a [2]

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

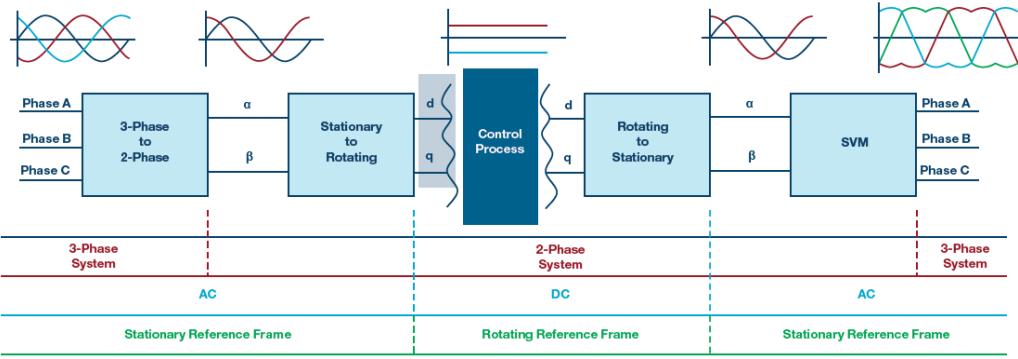


Rysunek 8: Transformata Clark'a [2]

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

Algorytm FOC pozwala uzyskać z trzech przebiegów prądów przemiennych, dwie składowe staloprądowe. 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 .

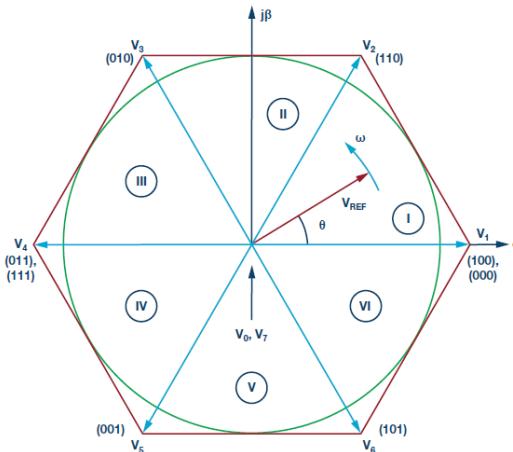
Zastosowanie odwrotnych transformat pozwala na sprowadzenie składowych stałych na trzy przebiegi sinusoidalne i wprowadzenie tych wartości na kolejny blok algorytmu FOC zwany SVPWM (ang. Space Vector Pulse Width Modulation) opisany w rozdziale 4. Blok ten steruje bramkami tranzystorów przetwornika, aby 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]

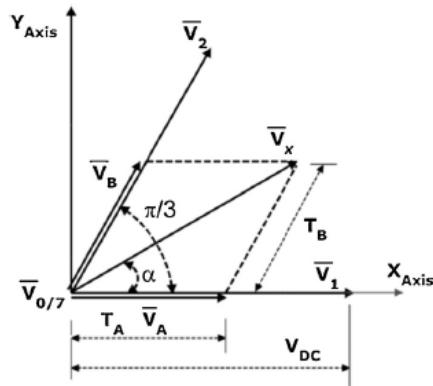
4 SVPWM

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 został objaśniony 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 , V_o , gdzie V_o jest wektorem zerowym.



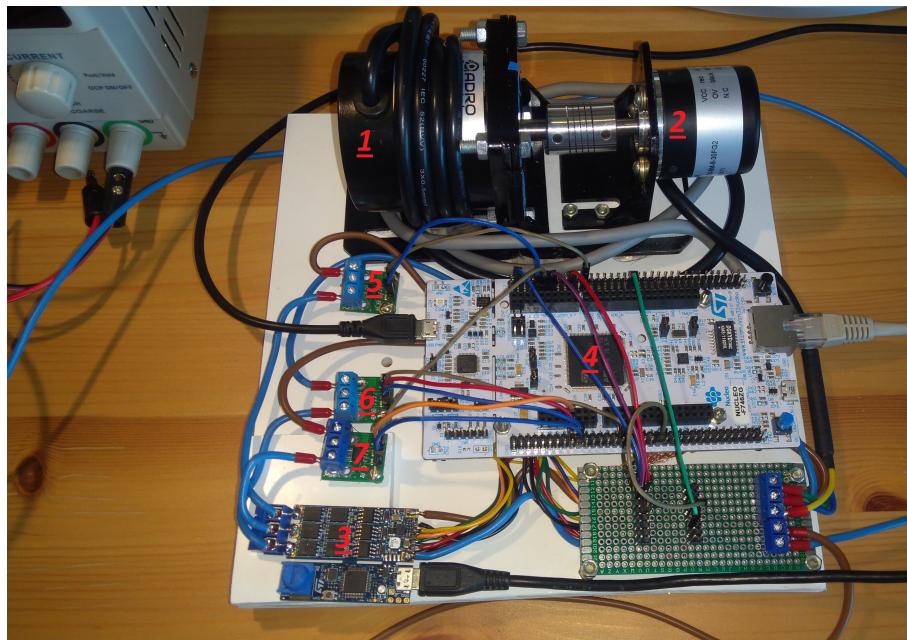
Rysunek 11: Generowanie wektora V_x [6]

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 Układ napędowy z silnikiem BLDC

Realizacja praktyczna układu napędowego jest przedstawiona poniżej (rysunek 12).



Rysunek 12: Napęd z silnikiem BLDC

5.1 Spis urządzeń

1. Silnik bezszczotkowy FXD57BL 24 VDC
2. Przetwornik obrotowo-impulsowy N38G6-720-BM-8-30FG2
3. Zestaw rozwojowy STM32 B-G431B-ESC1
4. Zestaw rozwojowy STM32 Nucleo F746ZG

5. Czujnik prądu Pololu 1185 ACS714 -5A : +5A
6. Czujnik prądu Pololu 1185 ACS714 -5A : +5A
7. Czujnik prądu Pololu 1185 ACS714 -5A : +5A
8. Zasilacz laboratoryjny KORAD 0-30V, 0-5A

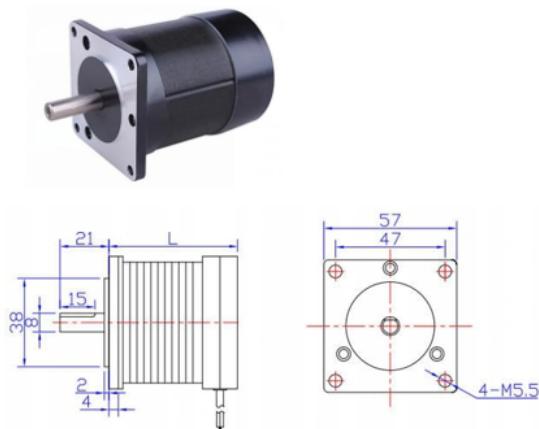
5.2 Dane techniczne i opis urządzeń

1. Silnik bezszczotkowy FXD57BL 24 VDC

Silnik wykorzystany do budowy napędu pokazany na rysunku 13

Parametry techniczne:

- Moc: 60W
- Napięcie zasilania: 24 V
- Prąd znamionowy: 3,3 A
- Maksymalna prędkość obrotowa: 3000 obr/min
- Moment znamionowy: 0,18 Nm
- Wirnik dwupolowy
- Długość silnika: 55 mm



Rysunek 13: Silnik BLDC

2. Inkrementalny przetwornik obrotowo-impulsowy N38G6-720-BM-8-30FG2

Przetwornik obrotowo-impulsowy inaczej enkoder jest czujnikiem mierzącym ruch. Przekształca ruch obrotowy w sygnał elektryczny o przebiegu prostokątnym. Enkoder inkrementalny nie generuje informacji o położeniu bezwzględny.

- rozdzielcość: 720 impulsów/obrót
- napięcie zasilania: 5 - 30 VDC
- rodzaj wyjścia: PUSH - PULL
- maksymalny pobór prądu: 150 mA
- maksymalne obciążenie prądowe: 30 mA
- maksymalna częstotliwość: 150 kHz
- znamionowa prędkość pracy: 5000 obr/min

3. Zestaw rozwojowy STM32 B-G431B-ESC1

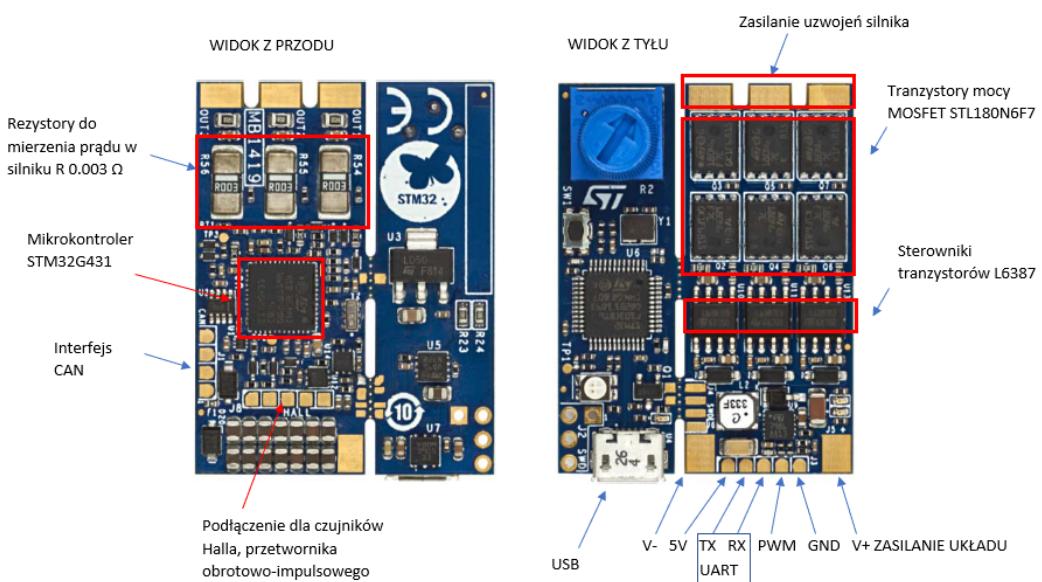
Zestaw rozwojowy B-G431B-ESC1 firmy STMicroelectronics oparty na mikrokontrolerze STM32G431CB jest dedykowanym układem elektronicznym dla napędów z silnikami BLDC/PMSM. Posiada przekształtnik energoelektroniczny zbudowany w oparciu o sterowniki L6387 i tranzystory mocy MOSFET STL180N6F7. Dla sterowania i monitorowania pracy silnika oraz do współpracy z innymi układami zapewnia różne sposoby komunikacji - UART, CAN i PWM. STM32G431CB wyposażony w procesor ARM Cortex M4 32-bity, pełen zestaw instrukcji DSP (ang. Digital Signal Processing) oraz blok do przetwarzania liczb zmiennoprzecinkowych FPU (ang. Floating-Point Unit) zapewnia możliwość implementacji różnych zaawansowanych algorytmów sterowania. Posiada wbudowane układy mierzące prąd w silniku[10]. Rysunek 14 przedstawia najistotniejsze elementy wbudowane w układ B-G431B-ESC1.

Parametry techniczne B-G431B-ESC1 [10]:

- napięcie znamionowe 60 V
- maksymalny prąd szczytowy (z układem chłodzenia): 40 A

Parametry techniczne STM32G431CB [10]:

- procesor: ARM Cortex M4 32-bity DSP
- częstotliwość taktowania procesora: 170 MHz
- Pamięć Flash: 128 KB
- Pamięć SRAM: 32 KB
- Przetwornik analogowo-cyfrowy 12-bitowy: 2
- Komparatory: 4
- Wbudowane wzmacniacze operacyjne: 3
- Kontroler DMA
- Interfejsy: UART, PWM, CAN



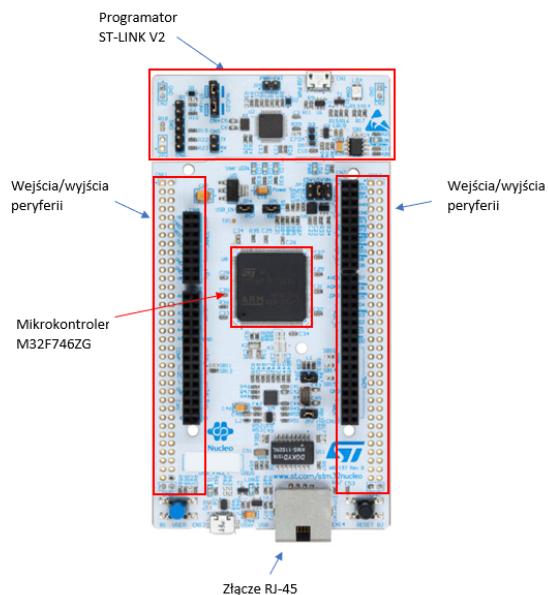
Rysunek 14: Silnik BLDC [10]

4. Zestaw rozwojowy STM32 Nucleo F746ZG

Nucleo F746ZG jest zestawem rozwojowym opartym na mikrokontrolerze STM32F746Z. Duża ilość peryferiów oraz wyprowadzonych pinów do ich podłączenia zapewnia wiele możliwości prototypowania. Posiada wbudowany programator ST-LINK/V2-1 oraz złącze RJ-45 do połączenia sieciowego.

Parametry techniczne mikrokontrolera STM32F746Z [8]:

- procesor: ARM Cortex M7 32-bity FPU, DSP
- częstotliwość taktowania procesora: 216 MHz
- Pamięć Flash: 1 MB
- Pamięć SRAM: 320 KB
- przetwornik analogowo-cyfrowy 12-bitowy: 3
- Liczniki: 18
- przetwornik cyfrowo-analogowe 12-bitowy: 2
- Interfejsy: UART, USART, I^2C , SPI, CAN, SAIs, HDMI, USB
- Kontroler DMA



Rysunek 15: Zestaw rozwojowy STM32 Nucleo F746ZG [9]

6 Wnioski

Spis rysunków

1	Przebiegi siły elektromotorycznej E, prądu I i momentu T dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [11]	4
2	Stojan silnika BLDC [4]	4
3	Wirnik silnika BLDC [4]	5
4	Uproszczony schemat 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
12	Napęd z silnikiem BLDC	11
13	Silnik BLDC	12
14	Silnik BLDC [10]	13
15	Zestaw rozwojowy STM32 Nucleo F746ZG [9]	14

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 Przepiórkowski. Troj fazowy falownik wektorowy zestaw ewaluacyjny tms320f28035 podstawy teoretyczne. *SKLEP.AVT.PL ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA*, 4, 2010.
- [8] STMicroelectronics. *STM32F745xx, STM32F746xx*, 2016.
- [9] STMicroelectronics. *UM1974, User manual, STM32 Nucleo-144 boards*, 2017.
- [10] STMicroelectronics. *UM2516 User Manual, Electronic speed controller Discovery kit for drones with STM32G431CB*, 2020.
- [11] Konrad Zajkowski and Stanisław Duer. Sterowanie prędkością obrotową silnika bezszczotkowego bldc. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 14:303–306, 2013.