

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 NAPEDU Z SILNIKIEM BLDC

PROMOTOR:  
DR INŻ. DOMINIK ŁUCZAK  
POTWIERDZAM PRZYJĘCIE PRACY:

.....  
DATA I PODPIS PROMOTORA

MATEUSZ SEMKŁO

2020-11-30

# Spis treści

<b>1 Wstęp</b>	<b>3</b>
<b>2 Silnik BLDC</b>	<b>4</b>
2.1 Budowa . . . . .	4
2.2 Zasada działania . . . . .	4
2.3 Sposoby sterowania . . . . .	5
2.4 Model matematyczny . . . . .	5
2.5 Charakterystyka silnika - wady, zalety . . . . .	7
<b>3 Field Orient Control</b>	<b>8</b>
<b>4 Modulacja wektorowa - SVPWM</b>	<b>9</b>
<b>5 Realizacja układu napędowego z silnikiem BLDC</b>	<b>12</b>
5.1 Realizacja sprzętowa . . . . .	12
5.2 Spis urządzeń . . . . .	12
5.3 Schemat elektryczny . . . . .	13
5.4 Opis i dane techniczne urządzeń . . . . .	13
5.5 Implementacja układu regulacji . . . . .	16
5.6 Komunikacja . . . . .	19
5.7 Interfejs użytkownika . . . . .	20
<b>6 Testowanie układu napędowego</b>	<b>21</b>
6.1 Sprawdzenie poprawności działania transformatora i modulacji SVPWM . . . . .	21
6.2 Testowanie układu regulacji . . . . .	22
6.2.1 Regulacja prądu . . . . .	22
<b>Wykaz ilustracji</b>	<b>27</b>

# 1 Wstęp

Tematem pracy inżynierskiej jest *Mikroprocesorowy kaskadowy układ regulacji prądu, prędkości i położenia dla napędu z silnikiem BLDC*. Zainteresowanie i zdobyta wiedza z zakresu automatyki, mikroprocesorów i maszyn elektrycznych spowodowała chęć stworzenia układu napędowego dla silnika elektrycznego przy wykorzystaniu możliwości mikrokontrolerów i stawieniu czoła trudnościom przy jego praktycznej realizacji.

Celem jest pokazanie możliwości wykorzystania mikroprocesora jako jednego ze sposobów na realizację układu regulacji dla silnika BLDC. Zakres pracy obejmuje:

- Dobór i uruchomienie mikroprocesorowej płyty rozwojowej STM32 dla wybranego układu napędowego z silnikiem BLDC
- Dobór parametrów regulatorów PID. Wykorzystanie regulatorów dostępnych w bibliotece CMSIS-DSP
- Opracowanie interfejsu użytkownika pozwalającego na parametryzację i monitoring pracy napędu w czasie rzeczywistym
- Analiza możliwości wykonania procedury automatycznego strojenia układu napędowego

Silnik BLDC (ang. Brushless Direct Current) należy do rodziny silników z magnesami trwałymi. Charakteryzuje się stałym momentem elektromagnetycznym w szerokim zakresie prędkości obrotowej. Brak komutatora zapewnia większą sprawność i żywotność silnika. Z powodu wielu zalet często wykorzystywane w automatyce i robotyce.

Silnik ze względu na konstrukcję wymaga bardziej złożonego sposobu sterowania w porównaniu z silnikiem prądu stałego. W tym celu wykorzystana została metoda FOC (ang. Field-orient control). Jest to jedna z powszechnie stosowanych technik w układach regulacji trójfazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Pozwala ona sprowadzić wartości prądów fazowych stojana z trójwymiarowego układ współrzędnych do wirującego układu o dwóch współrzędnych biegącego synchronicznie z wektorem strumienia wirnika. Uzyskujemy w ten sposób dostęp do wartości stałych, które można umieścić bezpośrednio w pętlach regulatorów PID i uzyskać możliwość regulacji prądem, prędkością i położeniem.

Do modulacji szerokości impulsów wykorzystano metodę SVPWM (ang. Space Vector Pulse Width Modulation). W porównaniu z alternatywną modulacją SPWM (ang. Sine Pulse Width Modulation) cechują się mniejszymi zniekształceniami sygnału spowodowanymi przez wyższe harmoniczne i wykorzystując większy przedział napięcia zasilania. W wyniku modulacji SVPWM generowane są wektory, które przyjmują kształt sześciokąta i dzielą przestrzeń na sześć sektorów. Wektor referencyjny jest generowany w wyniku aktywowania dwóch sąsiadujących wektorów z przestrzeni stanu w określonej sekwencji i czasie. W wyniku tych operacji formowane są trzy sygnały PWM dla trzech par tranzystorów przekształtnika energoelektronicznego.

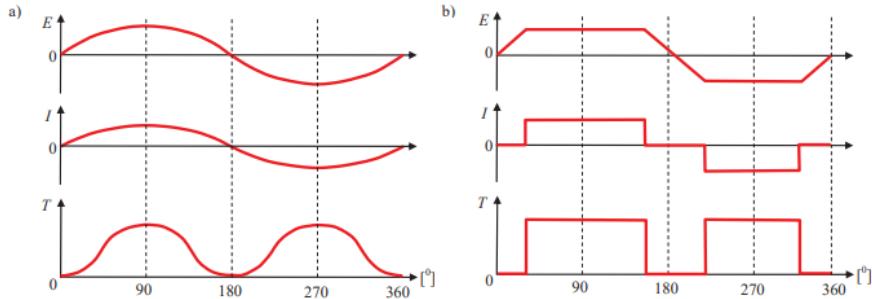
Głównymi elementami układu jest zestaw prototypowy STM32 B-G431B-ESC1 oraz STM32 Nucleo F746ZG. B-G431B-ESC1 wyposażony w mikrokontroler STM32G431CB, rdzeń ARM Cortex M4, trójfazowy przekształtnik energoelektroniczny jest układem realizującym proces regulacji prądu, prędkości i położenia wirnika. Nucleo F746ZG odpowiada za komunikację między regulatorem a interfejsem użytkownika. Aplikacja użytkownika jest napisana w języku python i łączy się z płytą Nucleo F746ZG za pośrednictwem przewodu sieciowego przy wykorzystaniu protokołu TCP/IP. Informacje przekazywane są w postaci łańcuchów znaków w formacie JSON. Specyfika układu pomiarowego prądu wymaga aby pomiar był wykonywany, gdy wszystkie tranzystory grupy górnej były wyłączone a grupy dolnej włączone. Wyzwolenie następuje w osi symetrii każdego okresu sygnału PWM. W funkcji obsługi zdarzenia przeprowadzane są wszystkie operacje związane z regulacją i modulacją sygnałów.

W układzie zdefiniowane są cztery regulatory PID: prądu, strumienia magnetycznego wirnika skojarzonego ze stojanem, prędkości i położenia wirnika. Są one połączone ze sobą w sposób kaskadowy. Pętle regulacji są zagnieżdżone jedna w drugiej, gdzie wyjście z regulatora pętli zewnętrznej ustala wartość zadaną pętli wewnętrznej.

## 2 Silnik BLDC

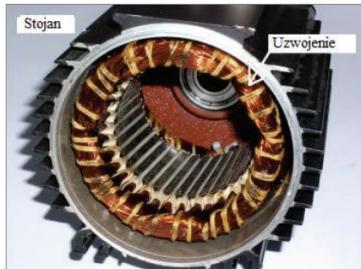
### 2.1 Budowa

Bezszerwotkowe silniki z magnesami trwałymi można podzielić na silniki prądu stałego BLDC oraz synchroniczne silniki prądu przemiennego PMSM (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor). Różnią się one kształtem przebiegu siły elektromotorycznej. Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi indukowanego napięcia, prądu i momentu elektromagnetycznego dla silnika BLDC i PMSM. [6]



Rysunek 1: Przebiegi siły elektromotorycznej  $E$ , prądu  $I$  i momentu  $T$  dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [14]

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 umieszczonej na wirniku zapewniają stałą wartość indukcji w szczeelinie maszyny i trapezoidalny kształt siły elektromotorycznej. Rysunek 2 i 3 przedstawia budowę stojana i wirnika przykładowego silnika bezszczotkowego. [7]



Rysunek 2: Stojan silnika BLDC [6]



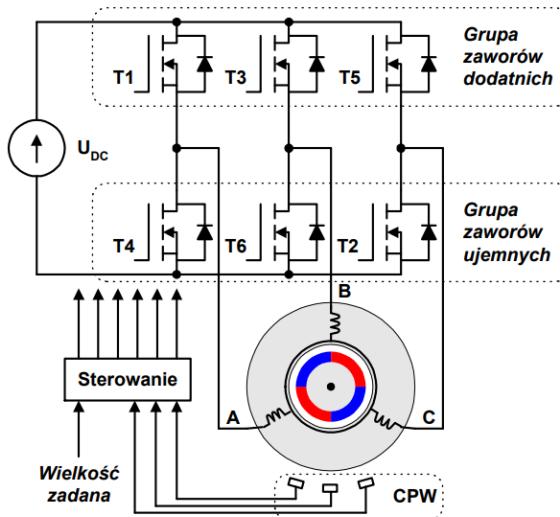
Rysunek 3: Wirnik silnika BLDC [6]

### 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 elektro-

magnetycznego, 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.<sup>[7]</sup>

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



Rysunek 4: Uproszczony schemat sterowania i zasilania silnika [3]

### 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 [7]:

- 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 rozemieszczone 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.
- komutacja sinusoidalna – przełączanie uzwojeń odbywa się w sposób quasi-ciągły. Prądy fazowe i siły elektromotoryczne powinny być sinusoidalne. Przekształtnik energoelektroniczny pełni funkcje falownika. Do pomiaru położenia wykorzystuje się przetwornik impulsowo-obrotowy lub algorytm do bezczujnikowego obliczania kąta obrotu wirnika. Zasilane są jednocześnie trzy uzwojenia.
- 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 [7]:

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

Me - moment elektromagnetyczny

p - liczba par biegunów

$\psi_p$  - 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 [7]:

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

$\theta_e$  - elektryczny kąt położenia wirnika

Łącząc powyższe wyrażenia 1 i 2 uzyskujemy moment elektromagnetyczny dla k-tej fazy [7]:

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

Moment całkowity jest równy sumie momentów elektromagnetycznych[7]:

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

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[7]:

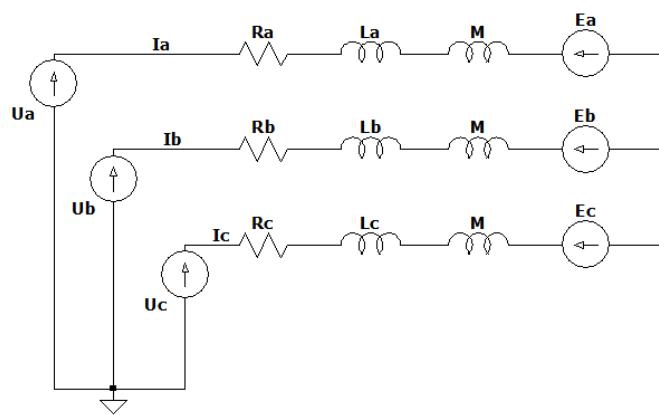
$$E_p = p\psi_p\omega \quad (6)$$

$\omega$  - prędkość obrotowa wirnika

Wyrażenie opisujące siłę elektromotoryczną indukowaną w k-tym uzwojeniu[7]:

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

Silnik BLDC można traktować jako szczególny przypadek silnika synchronicznego. Schemat zastępczy 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 [7]:

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

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

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

gdzie:

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

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

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

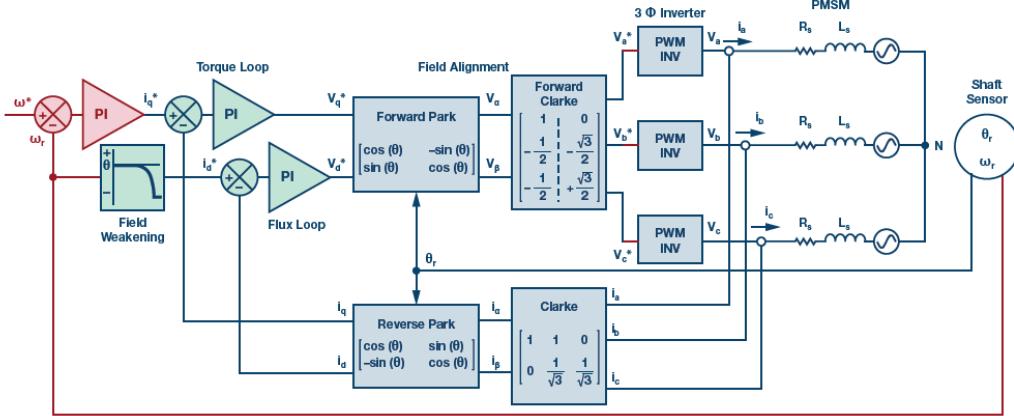
$$B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

## 2.5 Charakterystyka silnika - wady, zalety

Brak konwencjonalnego komutatora wydłuża żywotność silnika i nie wymaga konserwacji. Brak szczotek powoduje mniejsze tarcie, brak negatywnych skutków iskrzenia podczas komutacji oraz mniejsze zaburzenia elektromotoryczne. W porównaniu ze szczotkowym silnikiem prądu stałego uzwojenia twornika są zazwyczaj umieszczone w zewnętrznej części silnika, co zapewnia lepsze odprowadzanie ciepła do otoczenia. Magnesy trwałe mają bardzo małą przenikalność magnetyczną zbliżoną do przenikalności magnetycznej powietrza. Reaktancja twornika jest pomijalnie mała dzięki czemu osiągany jest duży moment elektromagnetyczny. Do wad należy zaliczyć bardziej skomplikowany sposób sterowania silnikiem przez zastosowanie komutatora elektronicznego w postaci przekształtnika energoelektronicznego do cyklicznego zasilania uzwojeń twornika.

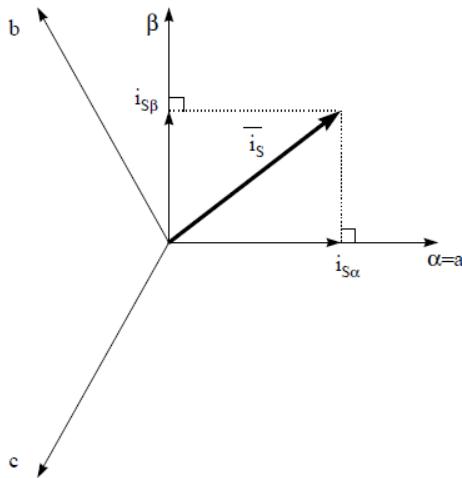
### 3 Field Orient Control

Algorytm wektorowy FOC (ang. Field Orient Control) przedstawiony schematycznie na rysunku 6 jest jedną z powszechnie stosowanych metod sterowania silników trójfazowych z magnesami trwałymi. Polega na bezpośrednim sterowaniu wirującym polem stojana. Pozwala uzyskać dokładną i dynamiczną regulację momentu elektrodynamicznego, prędkości i położenia wirnika.[9]



Rysunek 6: Algorytm FOC [5]

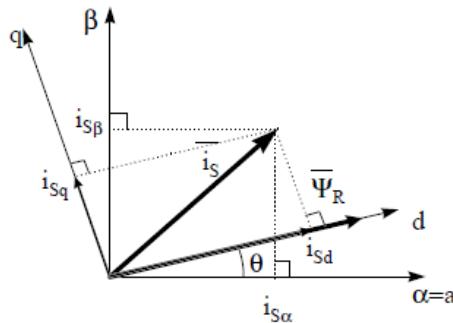
Metoda FOC steruje pradami fazowymi stojana reprezentowanymi w postaci wektora. Czujniki prądu dostarczają informację zwrotną o aktualnych prądach fazowych. Za pomocą transformaty Clark'a, wyrażona za pomocą wzoru 17 i pokazana na rysunku 7, przekształca trójwymiarowy układ współrzędnych, w którym opisane są prady 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.[9] [4]



Rysunek 7: Transformata Clark'a [4]

Wyrażenie opisujące transformatę Clark'a [9]:

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



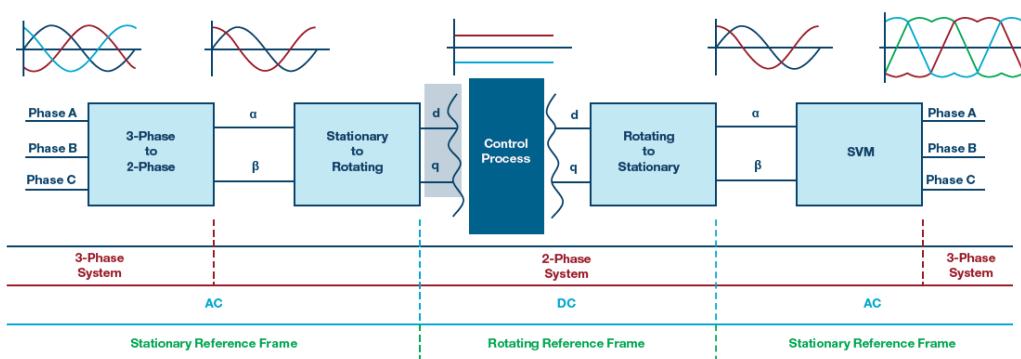
Rysunek 8: Transformata Park'a [4]

Wyrażenie opisujące transformatę Park'a [9]:

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

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. 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 do trzech przebiegów sinusoidalnych i wprowadzenie ich 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.



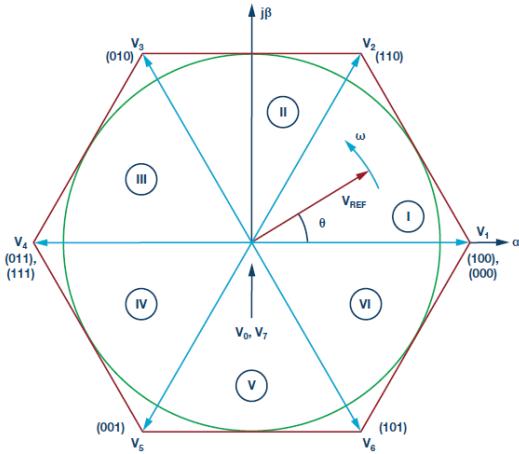
Rysunek 9: Transformacje w algorytmie FOC [5]

## 4 Modulacja wektorowa - SVPWM

Wydajność prądowa mikrokontrolera jest niewystarczająca aby zasilić silnik, dlatego uzwojenia stojana są bezpośrednio podłączone do przekształtnika energoelektronicznego zasilanego napięciem stałym. Schemat przekształtnika przedstawia rysunek 4. SVPWM jest metodą pozwalającą określić, sekwencje i czas trwania złączeń tranzystorów. W porównaniu z konwencjonalną metodą SPWM (ang. Sine Pulse

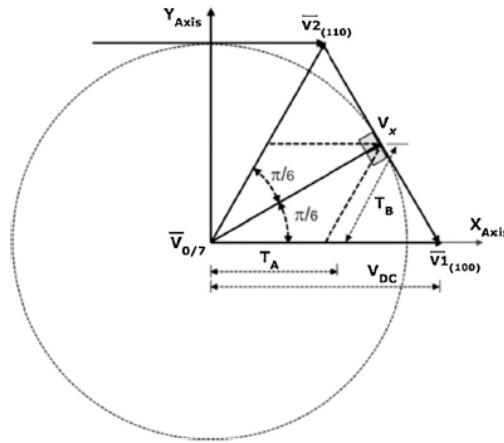
Width Modulation) do sterowania silników synchronicznych, pozwala na wykorzystanie szerszego zakresu napięcia zasilania i zmniejszenia zniekształceń spowodowanych przez wyższe harmoniczne.[8]

Elementami wykonawczymi są tranzystory mocy, które można podzielić na grupę 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 (sześć wektorów aktywnych, dwa wektory zerowe lub nieaktywne) i dzielą przestrzeń na sześć sektorów - schematycznie przedstawiono na rysunku 10.



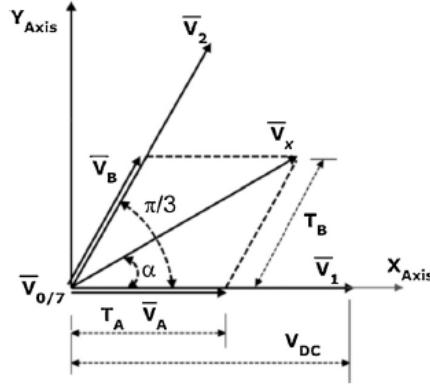
Rysunek 10: Wektory w przestrzeni stanu i podział na sektory [5]

Maksymalne napięcie fazowe jest równe  $2/3$  VDC. Aby uzyskać nieodkształcony przebieg sinusoidalny maksymalne napięcie szczytowe jest ograniczone do wartości promienia okręgu wpisanego w sześciokąt i jest równe  $V_{max} = V_{dc}\sqrt{3}/2$ . Powyższe założenie przedstawiono na rysunku 11.[8]



Rysunek 11: Maksymalna długość wektora [5]

Na przykładzie rysunku 12 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  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_0$ , gdzie  $V_0$  jest wektorem zerowym.[8]



Rysunek 12: Generowanie wektora  $V_X$  [8]

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  $V1, \dots, V6$ ) jest aktywna.[8]

Z równania [8]:

$$\begin{cases} |V_x| \cos(\alpha) \times T_s = V_{DC} \times T_A + V_{DC} \times \cos(\pi/3) \times T_B \\ |V_x| \sin(\alpha) \times T_s = V_{DC} \times \sin(\pi/3) \times T_B \end{cases} \quad (19)$$

oraz z wyrażenia 20, które pozwala zredukować kąt  $\alpha$  do przedziału od 0 do  $\pi/3$  [2] :

$$\theta = \phi - \frac{k-1}{3}\pi \quad (20)$$

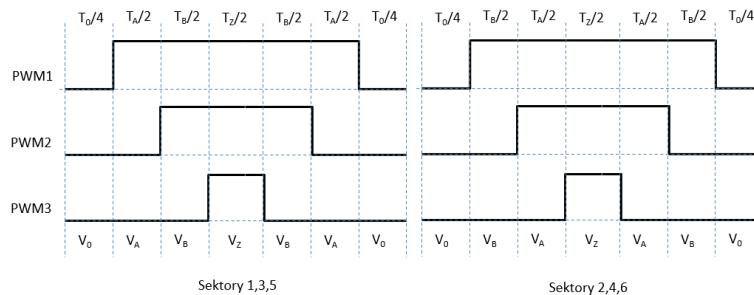
gdzie: k - sektor 1..6

można wyznaczyć zależność pozwalającą określić czasy  $T_A$ ,  $T_B$  generowania wektorów  $V_A$ ,  $V_B$  dla dowolnego sektora [2] :

$$\begin{cases} T_A = \frac{\sqrt{3}T_s V_x}{V_{DC}} (\sin(k\pi/3 - \theta)) \\ T_B = \frac{\sqrt{3}T_s V_x}{V_{DC}} (\sin((k-1)\pi/3 - \theta)) \end{cases} \quad (21)$$

Suma czasów  $T_A$ ,  $T_B$  i  $T_0$  jest równa okresowi modulacji szerokości impulsów  $T_S$ .

Znając sektor i czasy  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_0$  można wygenerować dowolny wektor w przestrzeni stanu. Aby tego dokonać należy zastosować odpowiednią sekwencję załączeń wektorów  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_0$ . Wektory te, w zależności od sektora, w którym się znajdują, mają swoją reprezentację w odpowiadającej im kombinacji załączeń kluczowych tranzystorów przekształtnika. Rysunek 13 przedstawia sekwencje wektorów  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_0$  i czasy ich aktywności w zależności od umiejscowienia wektora referencyjnego w przestrzeni stanu. W wyniku powyższych operacji otrzymujemy trzy sygnały PWM dla każdej gałęzi trójfazowego przekształtnika [?].

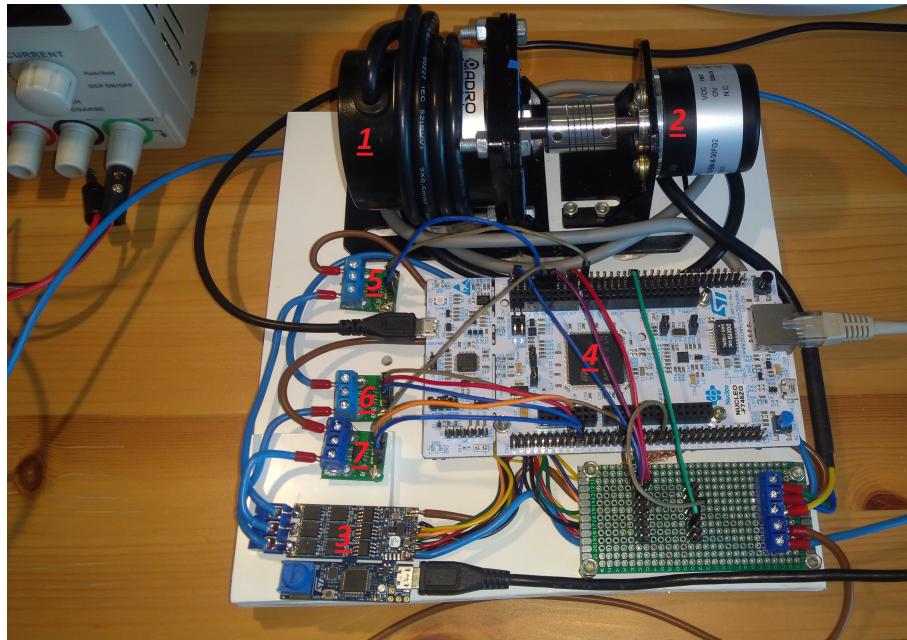


Rysunek 13: Sekwencja generowania wektora referencyjnego

## 5 Realizacja układu napędowego z silnikiem BLDC

### 5.1 Realizacja sprzętowa

Realizacja praktyczna układu napędowego jest przedstawiona na rysunku 14.

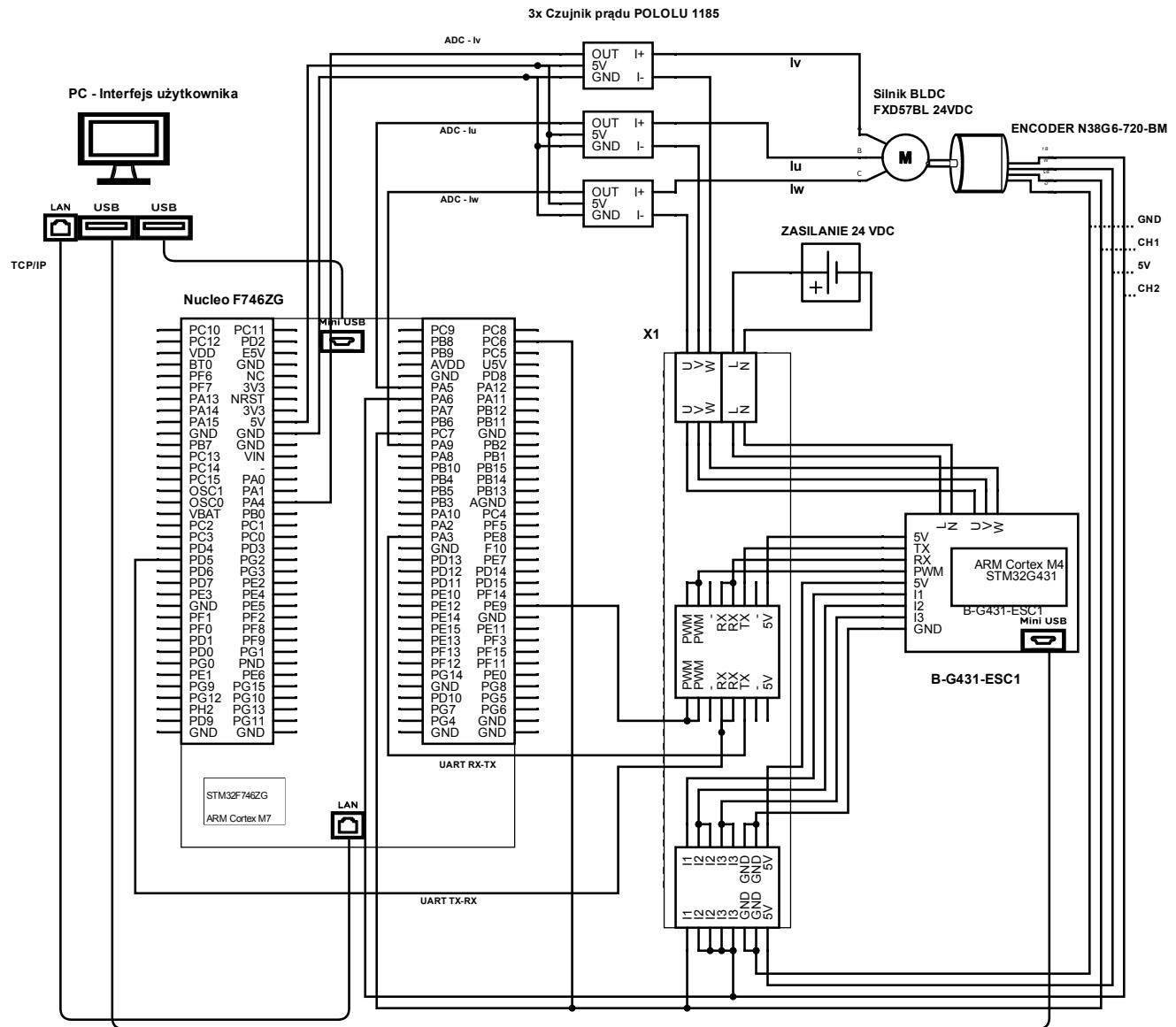


Rysunek 14: Napęd z silnikiem BLDC

### 5.2 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

### 5.3 Schemat elektryczny



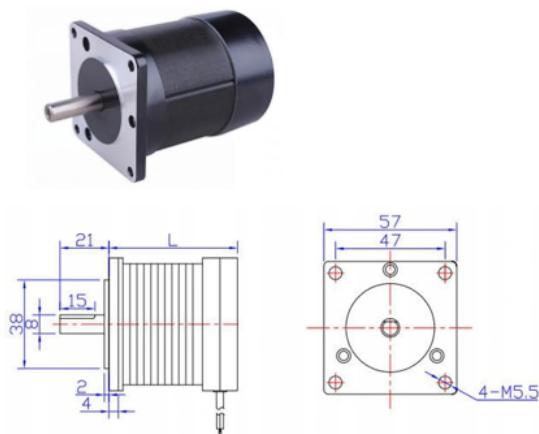
### 5.4 Opis i dane techniczne urządzeń

#### 1. Silnik bezszczotkowy FXD57BL 24 VDC

Silnik wykorzystany do budowy napędu pokazany na rysunku 15

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 15: 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 pracą silnika oraz do współpracy z innymi układami zapewnia różne sposoby komunikacji - UART, CAN i PWM. STM32G431CB wyposażony w procesor ARM Cortex M4 32-bit, 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. Rysunek 16 przedstawia najistotniejsze elementy wbudowane w układ B-G431B-ESC1.[13]

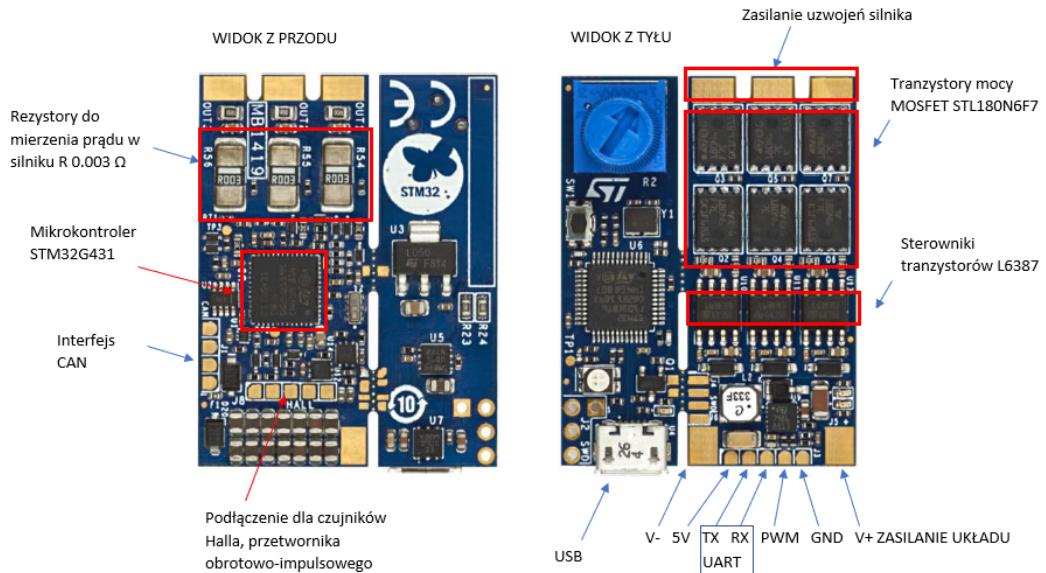
Parametry techniczne B-G431B-ESC1 [13]:

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

Parametry techniczne STM32G431CB [13]:

- procesor: ARM Cortex M4 32-bit 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



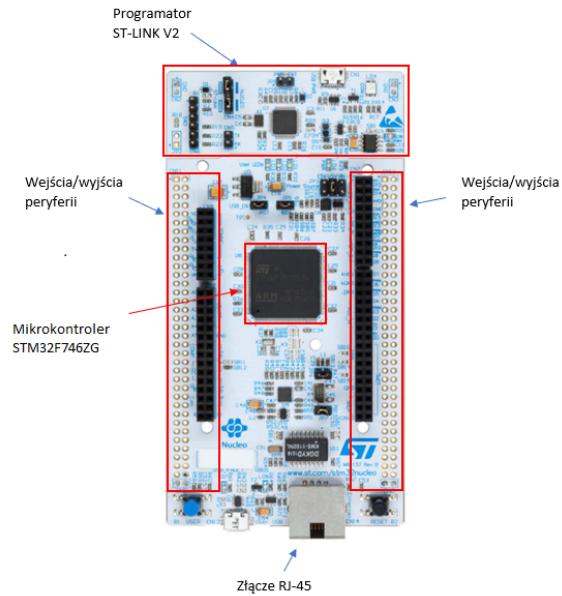
Rysunek 16: Zestaw rozwojowy STM32 B-G431-ESC1 [13]

#### 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. Rysunek 17 przedstawia układ Nucleo F746ZG.

Parametry techniczne mikrokontrolera STM32F746Z [10]:

- procesor: ARM Cortex M7 32-bit 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<sup>2</sup>C, SPI, CAN, SAIs, HDMI, USB
- Kontroler DMA

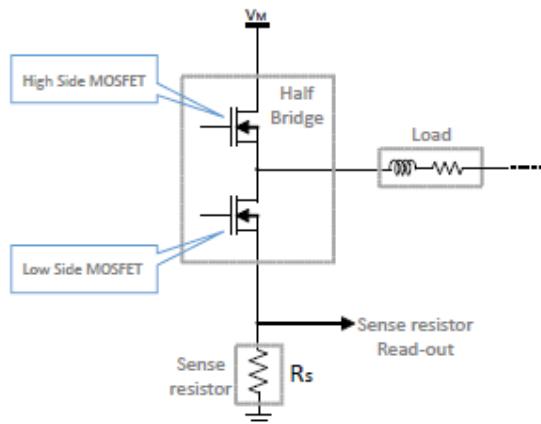


Rysunek 17: Zestaw rozwojowy STM32 Nucleo F746ZG [11]

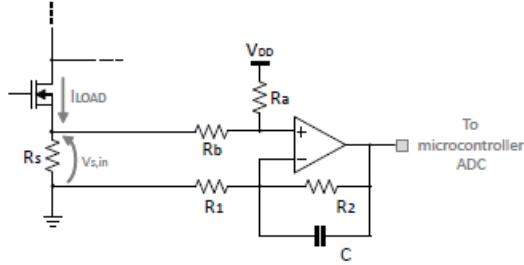
## 5.5 Implementacja układu regulacji

W zestawie rozwojowym B-G431-ESC został zaimplementowany układ regulacji prądu, prędkości i położenia dla napędu z silnikiem BLDC przy wykorzystaniu metod FOC i SVPWM.

Do mierzenia prądów fazowych zostały wykorzystane wbudowane, dedykowane układy. Mierzony jest spadek napięcia na rezystorach umieszczonych między dolną grupą tranzystorów mocy a masą. Na rysunku 18 przedstawiono sposób pomiaru. W wyniku bardzo małe rezystancji wynoszącej  $0.03 \Omega$  sygnał jest wzmacniany przez wzmacniacz operacyjny i za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego uzyskiwane aktualne wartości prądów - rysunek 19.



Rysunek 18: Pomiar prądu [12]



Rysunek 19: Wzmacnianie mierzonego sygnału [12]

Pomiar prędkości odbywa się za pomocą enkodera. Licznik skonfigurowany w trybie Mode Reset resetuje się w momencie podania stanu wysokiego na jeden z kanałów, do którego podłączony jest enkoder. Znając częstotliwość zliczania i okres między wystąpieniem dwóch stanów wysokich można w łatwy sposób obliczyć aktualną prędkość.

Pomiar położenia wirnika również odbywa się przy pomocy enkodera. Licznik w konfiguracji Encoder Mode zlicza wykryte zbocza z dwóch kanałów, do których podłączone są dwa sygnały z czujnika ruchu przesunięte w fazie. W zależności od kierunku obrotu licznik jest inkrementowany lub dekrementowany. Po zliczeniu ilości impulsów równej rozdzielcości enkodera licznik zlicza od zera.

Biblioteka CMSIS-DSP udostępnia szereg funkcji dla obliczeń transformat, regulatorów PID oraz funkcji trygonometrycznych. Funkcja obliczająca wartość sygnału wyjściowego regulatora PID ma postać [1]:

```
float32_t arm_pid_f32 (arm_pid_instance_f32 *S, float32_t in)
```

gdzie:

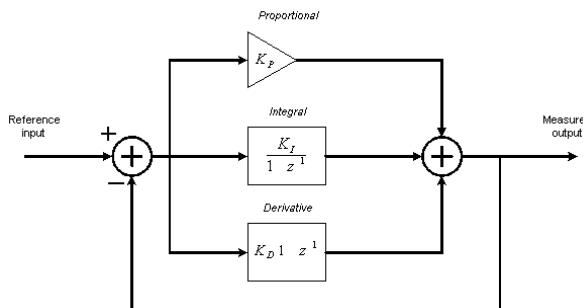
float32\_t in – uchyb

arm\_pid\_instance\_f32 \*S - struktura [A0, A1, A2, Kp, Ki, Kd, state[3]] opisana wyrażeniem 22:

$$\begin{cases} y[n] = y[n-1] + A0 * x[n] + A1 * x[n-1] + A2 * x[n-2] \\ A0 = Kp + Ki + Kd \\ A1 = (-Kp) - (2 * Kd) \\ A2 = Kd \end{cases} \quad (22)$$

Kp- wzmacnienie, Ki- stała całkowania, Kd- stała różniczkowania

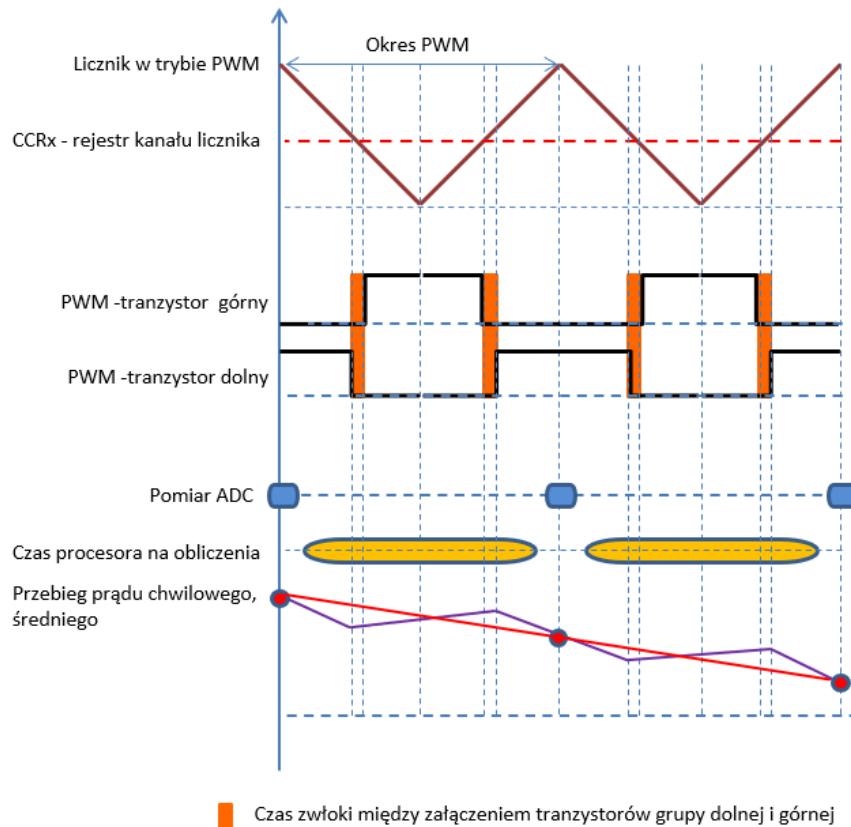
Rysunek poniżej reprezentuje schemat blokowy regulatora PID biblioteki CMSIS-DSP.



Rysunek 20: Schemat regulatora PID biblioteki CMSIS-DSP [1]

Modulacja wektorowa SVPWM składa się z funkcji, które na podstawie zadanego wektora referencyjnego wyznacza trzy sygnały PWM oraz licznika skonfigurowanego w trybie PWM Center Mode z trzema kanałami do wygenerowania sygnałów PWM dla trzech par tranzystorów przekształtnika energoelektronicznego. Dodatkowo czwarty kanał przeznaczony jest do określenia momentu uruchomienia przetwornika ADC i przypada on w połowie okresu PWM, gdzie wszystkie tranzystory grupy dolnej są włączone a

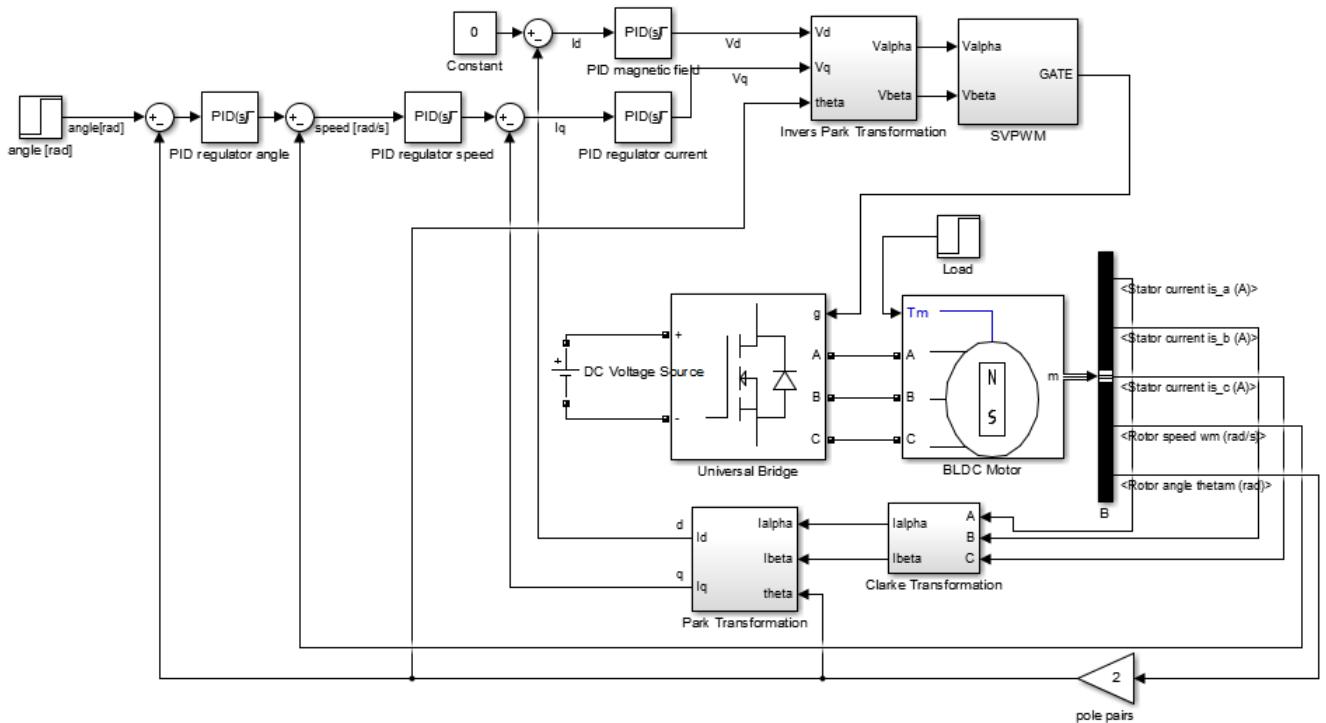
grupy górnej wyłączone. Na rysunku 21 przedstawiono synchronizację wyzwalania przetwornika ADC z sygnałami PWM.



Rysunek 21: Synchronizacja sygnału PWM z wyzwalaniem przerwania od przetwornika ADC

W funkcji obslugi przerwania od zdarzenia przetwornika ADC obliczane są transformaty, funkcje regulatorów PID, transformaty odwrotne i funkcje modulacji wektorowej. W wyniku tych operacji, za pomocą licznika z kanałami sterującymi bramkami tranzystorów przekształtnika, zostają wygenerowane trzy sygnały PWM.

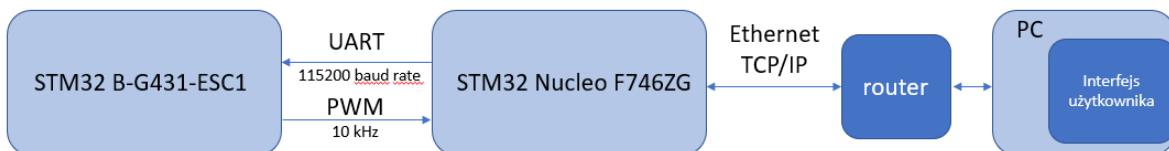
Do regulacji prądu, prędkości i położenia zastosowano cztery regulatory PID połączone ze sobą w sposób kaskadowy. Wynik regulatora zewnętrznej pętli wprowadzany jest na wejście regulatora pętli wewnętrznej. Schemat przedstawiono na rysunku 22. Regulacja odbywa się z częstotliwością wynoszącą 10kHz.



Rysunek 22: Model napędu silnika BLDC

## 5.6 Komunikacja

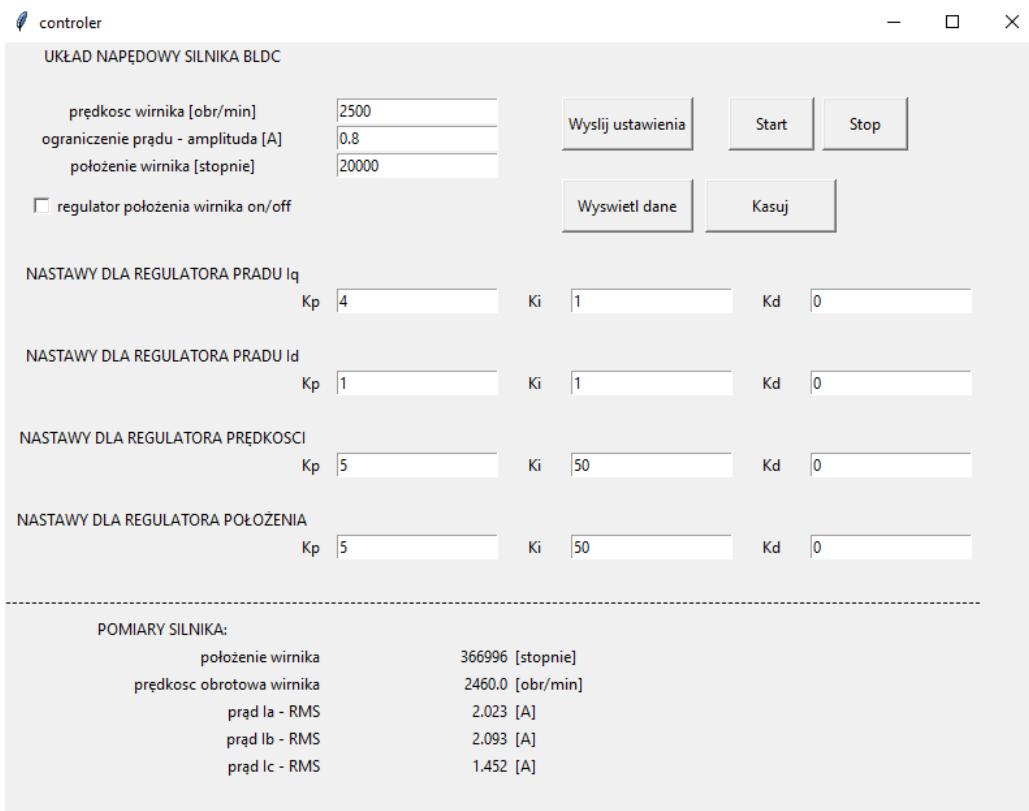
Zestaw ewaluacyjny Nucleo F746ZG jest głównym węzłem komunikacyjnym. Łączy się ze sterownikiem B-G431-ESC1 za pomocą portu szeregowego UART o prędkości transmisji 115200 bitów na sekundę. Za pomocą tego portu wysyłane są wartości zadane prądu, prędkości, położenia wirnika, nastawy regulatorów oraz ustawienia konfiguracyjne. B-G431-ESC1 generuje sygnał PWM do synchronizacji pomiarów i obliczeń z płytą Nucleo F746ZG. Rysunek 23 przedstawia graficzny schemat układu komunikacji. Nucleo F746ZG, wyposażony w Ethernet i złącze RJ45, łączy się z interfejsem użytkownika zaimplementowanym na zdalnym komputerze za pomocą przewodu sieciowego i routera. Informacje przekazywane są za pomocą protokołu TCP/IP w postaci łańcuchów znaków we formacie JSON (ang. JavaScript Object Notation). JSON jest formatem zapisu struktur danych przeznaczonym do wymiany informacji między aplikacjami. Dane zapisywane w notacji atrybut - wartość charakteryzuje się prostotą i czytelnością. Za pomocą interfejsu użytkownika wysyłane są wartości zadane, nastawy regulatorów i ustawienia a odbierane bieżące wartości prądów, prędkości i położenia wirnika.



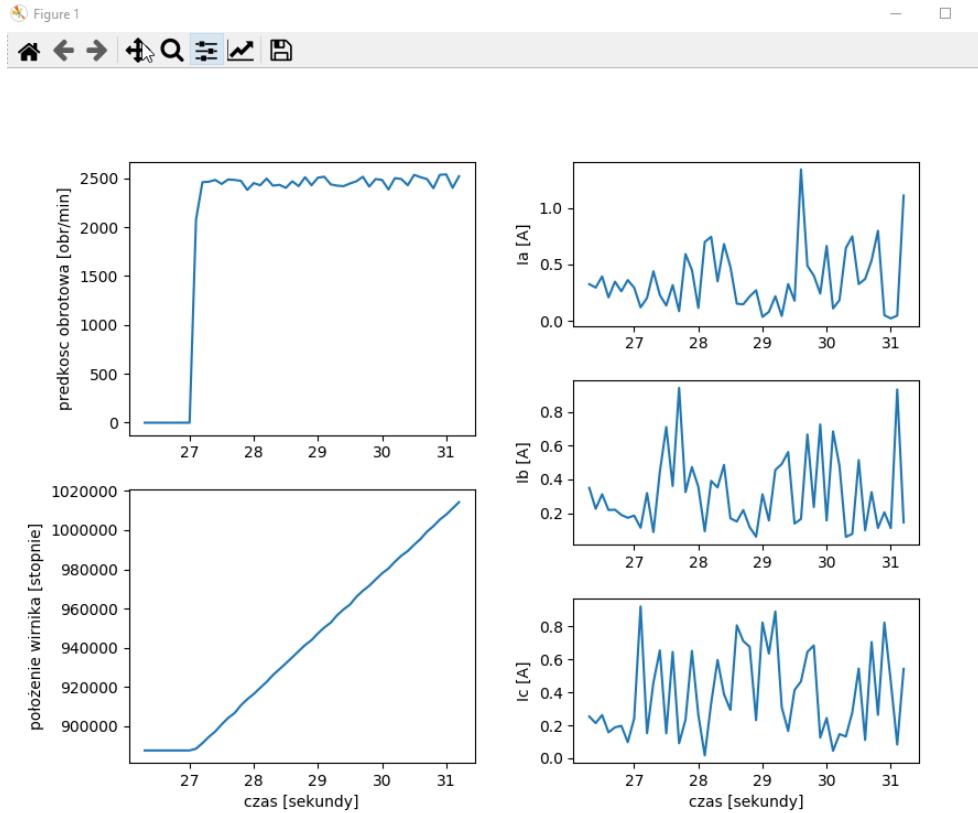
Rysunek 23: Schemat układu komunikacji

## 5.7 Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika został napisany w języku Python przy pomocy oprogramowania Spyder w środowisku Anaconda. Aplikacja za pomocą Ethernetu i protokołu TCP/IP łączy się z płytą Nucleo F746ZG na której zaimplementowany jest serwer TCP. Informacje wysyłane są w postaciłańcuchów znaków we formacie JSON. Aplikacja wysyła do serwera zapytania cyklicznie co 20 ms. W odpowiedzi serwer zwraca informacje o bieżących wartościach prądów fazowych, prędkości i położeniu wirnika. Na rysunku 24 i 25 przedstawiony jest interfejs aplikacji. Użytkownik ma możliwość określania wartości zadanych prądu, prędkości, położenia wirnika oraz nastaw dla regulatorów PID. Dodatkowo istnieje możliwość wyłączenia regulatora położenia i pozostawienia tylko aktywnego regulatora prądu i prędkości. Przycisk *Wyślij ustawienia* powoduje dodanie do zapytania danych konfiguracyjnych i aktualizowanie ustawień napędu. *Start, stop* uruchamia i zatrzymuje prace silnika. Przycisk *Wyświetl dane* przedstawia aktualne informacje z czujników w części aplikacji oznaczonej jako *POMIARY SILNIKA* oraz dodatkowo w osobnym oknie dialogowym przedstawia dane w postaci wykresów. Przycisk *Kasuj* zatrzymuje i czyści obszar wyświetlania wykresów.



Rysunek 24: Interfejs użytkownika

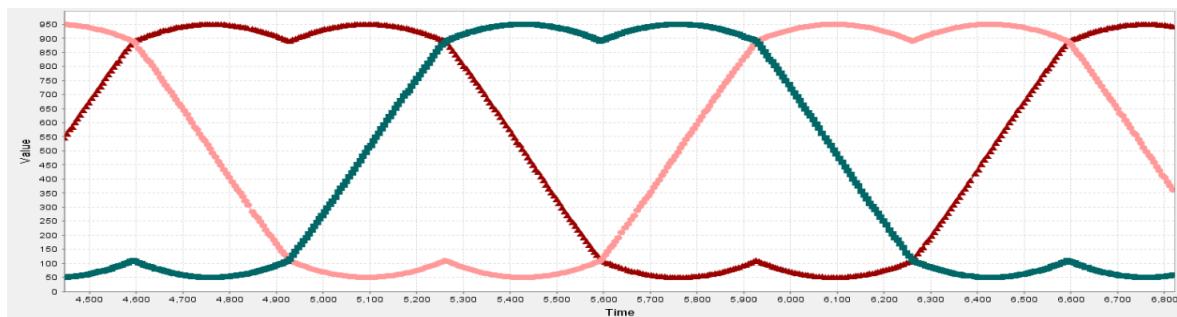


Rysunek 25: Interfejs użytkownika

## 6 Testowanie układu napędowego

### 6.1 Sprawdzenie poprawności działania transformat i modulacji SVPWM

Jednym z elementów układu są transformaty i modulacja SVPWM. Składają się one ze zbioru funkcji, które zostały zaimplementowane i przetestowane w celu sprawdzenia poprawności działania przed przystąpieniem do testowania wraz z regulatorami PID. W wyniku działania transformat i SVPWM dla trzech wejściowych sygnałów sinusoidalnych o amplitudzie 1000, częstotliwości 0.5 Hz, przesuniętych w fazie o 120 stopni generowane są trzy przebiegi o bardzo zbliżonych parametrach co sygnały wejściowe. Rysunek 26 pokazuje przebieg wygenerowanych sygnałów, które następnie zostaną przekształcone w sygnały prostokątne i wprowadzone na przetwornik energoelektroniczny. Do podglądu przebiegów zostało wykorzystane oprogramowanie STMStudio, które umożliwia graficzne wyświetlenie stanu zmiennych programu w czasie rzeczywistym.



Rysunek 26: Przebiegi wygenerowanych sygnałów na podstawie trzech sygnałów sinusoidalnych

## 6.2 Testowanie układu regulacji

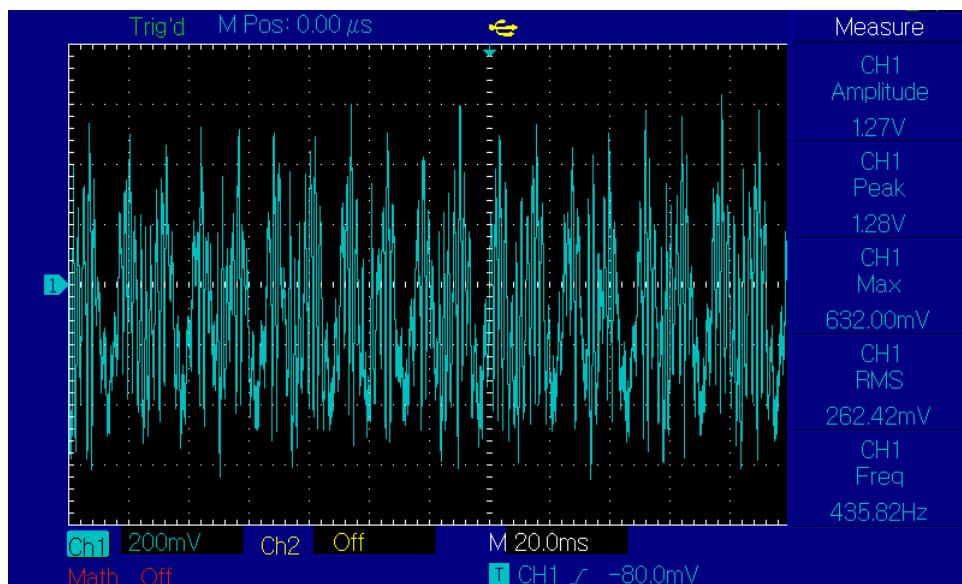
Układ został przetestowany dla nastaw regulatorów opisanych na rysunku 27.

NASTAWY DLA REGULATORA PRĄDU $I_q$					
Kp	4	Ki	1	Kd	0
NASTAWY DLA REGULATORA PRĄDU $I_d$					
Kp	1	Ki	1	Kd	0
NASTAWY DLA REGULATORA PRĘDKOŚCI					
Kp	5	Ki	50	Kd	0
NASTAWY DLA REGULATORA POŁOŻENIA					
Kp	5	Ki	50	Kd	0

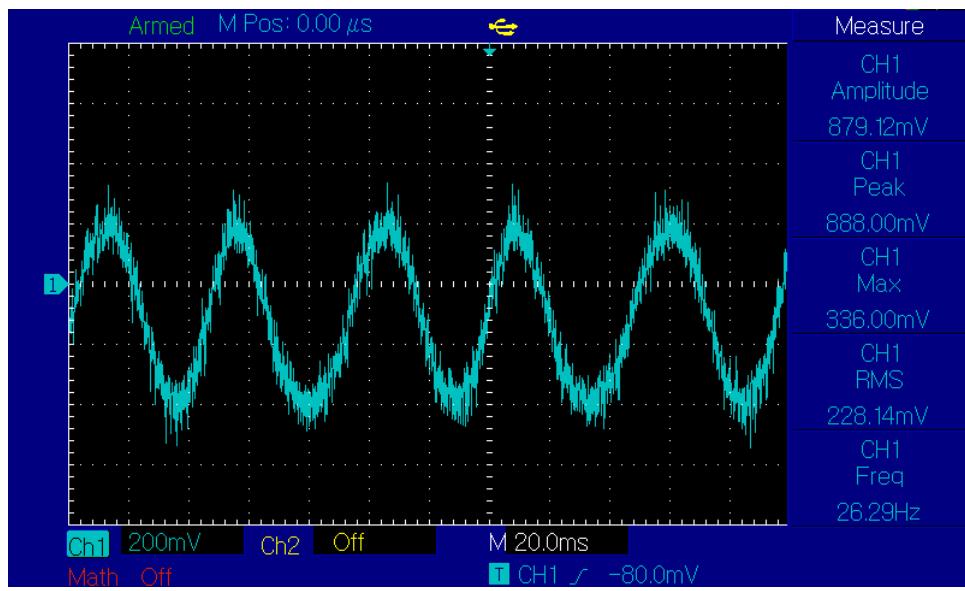
Rysunek 27: Nastawy regulatorów PID

### 6.2.1 Regulacja prądu

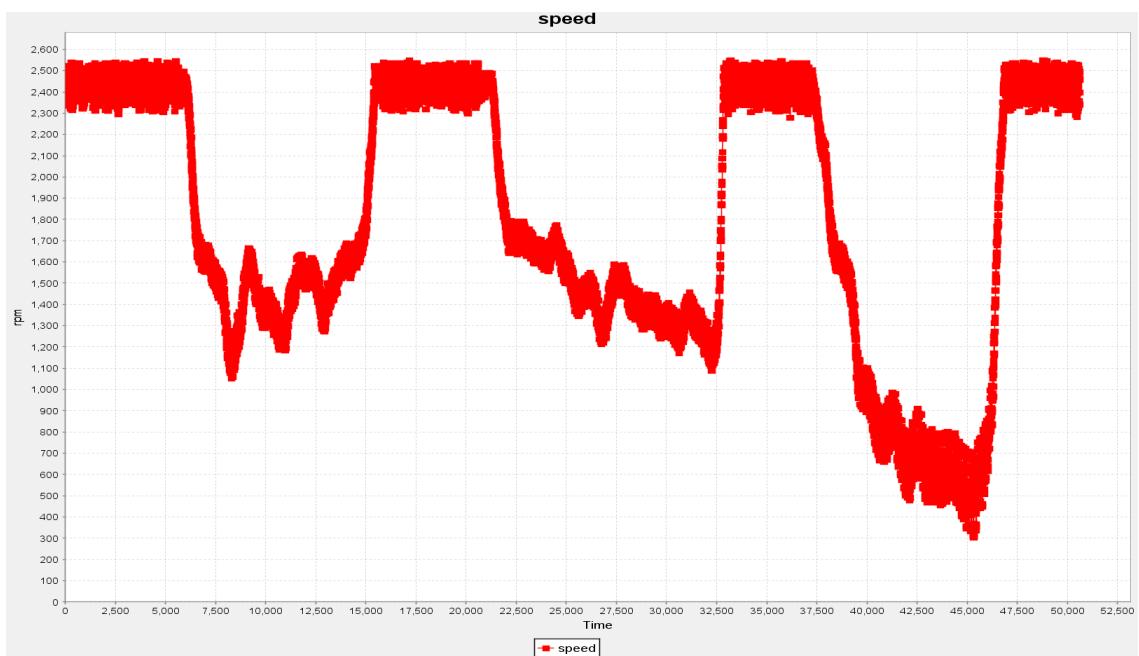
W celu sprawdzenia poprawności działania regulatora prądu wykonano pomiary dla trzech wartości amplitud składowej prądu  $I_q$ : 0.3A, 0.5A, 1A oraz składowej oddziaływania pola magnetycznego wirnika  $I_d$ : 0 dla przypadku gdzie wirnik nie został obciążony i dla przypadku działania zewnętrznego momentu oporowego. Wartość zadana prędkości obrotowej wynosi 2500 obr/min, regulator położenia wirnika jest wyłączony. Przebiegi przedstawione są rysunkach 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34. Pomiary zostały wykonane za pomocą oscyloskopu UNI-T UTD2102CEX. Do wyprowadzeń uzołojeń silnika zostały podłączone rezystory o wartości 1  $\Omega$  dzięki czemu spadek napięcia o wartości 1V odpowiada prądowi o wartości 1A.



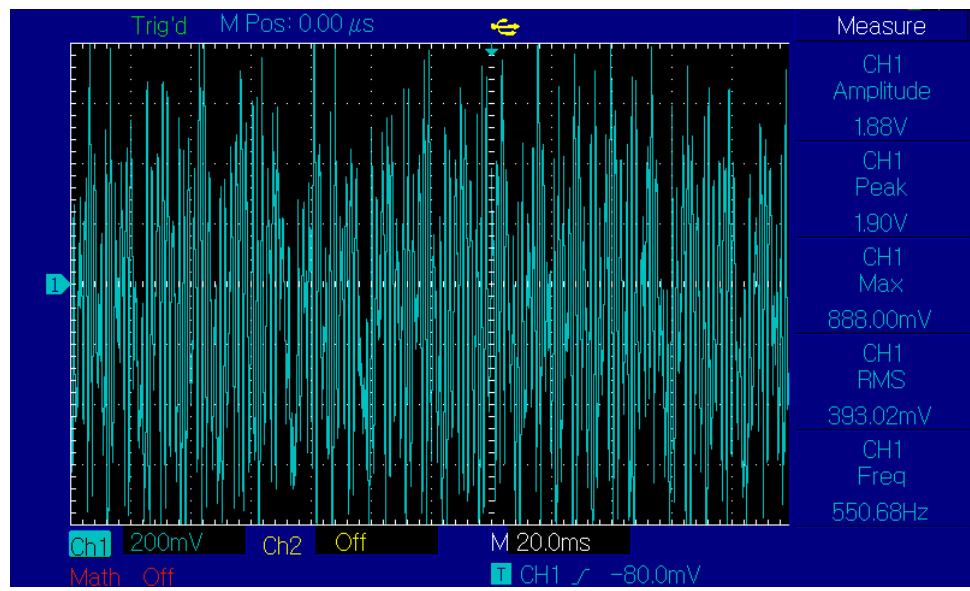
Rysunek 28: Przepiegi prądu dla wartości amplitudy 0.3A bez obciążenia



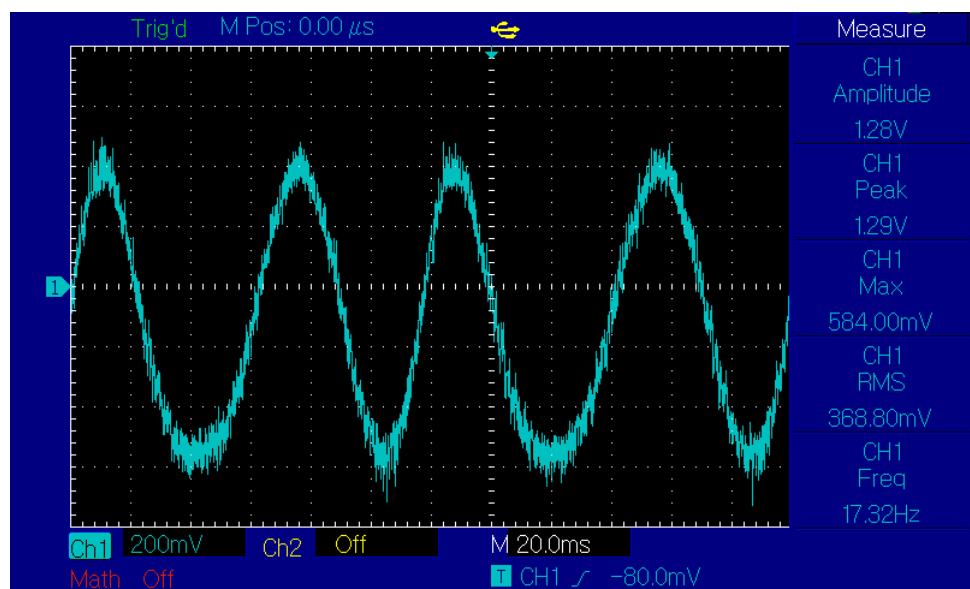
Rysunek 29: Przepiegi prądu dla wartości amplitudy 0.3A z obciążeniem



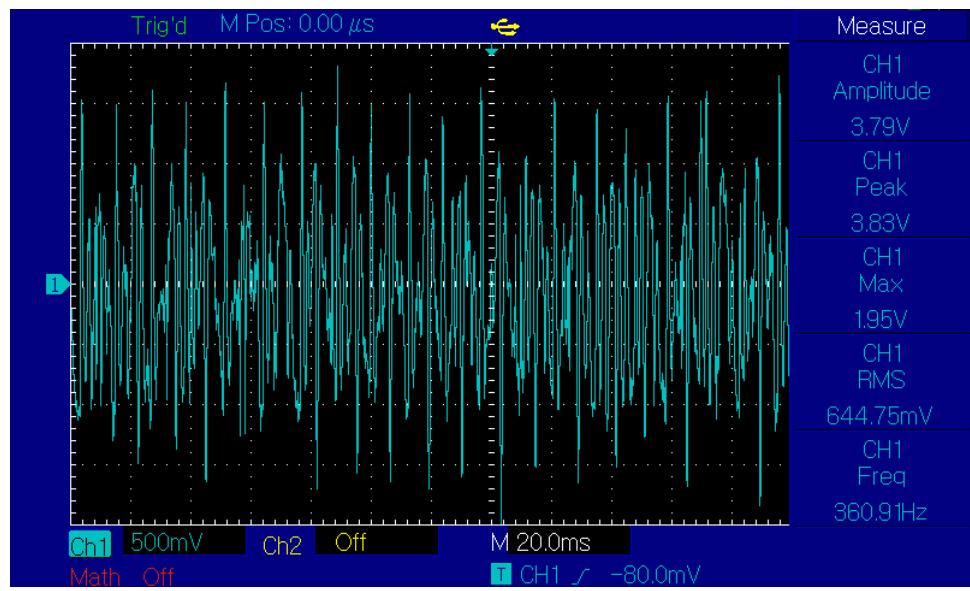
Rysunek 30: Przepiegi prędkości obrotowej dla cyklicznego obciążania i obciążania wału silnika dla prędkości zadanej 2500 obr/min i amplitudy prądu 0.3A



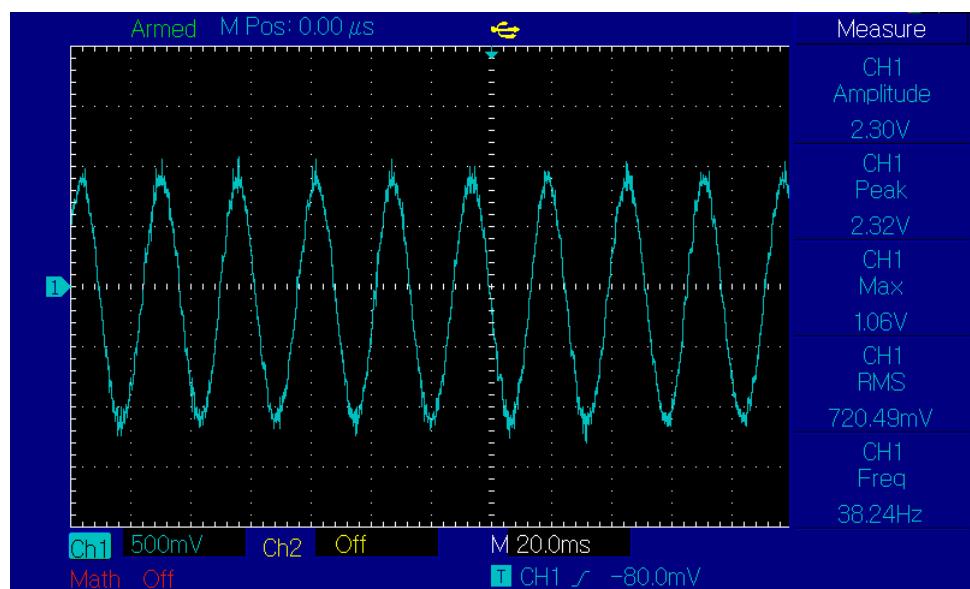
Rysunek 31: Przepieg prądu dla wartości amplitudy 0.5A bez obciążenia



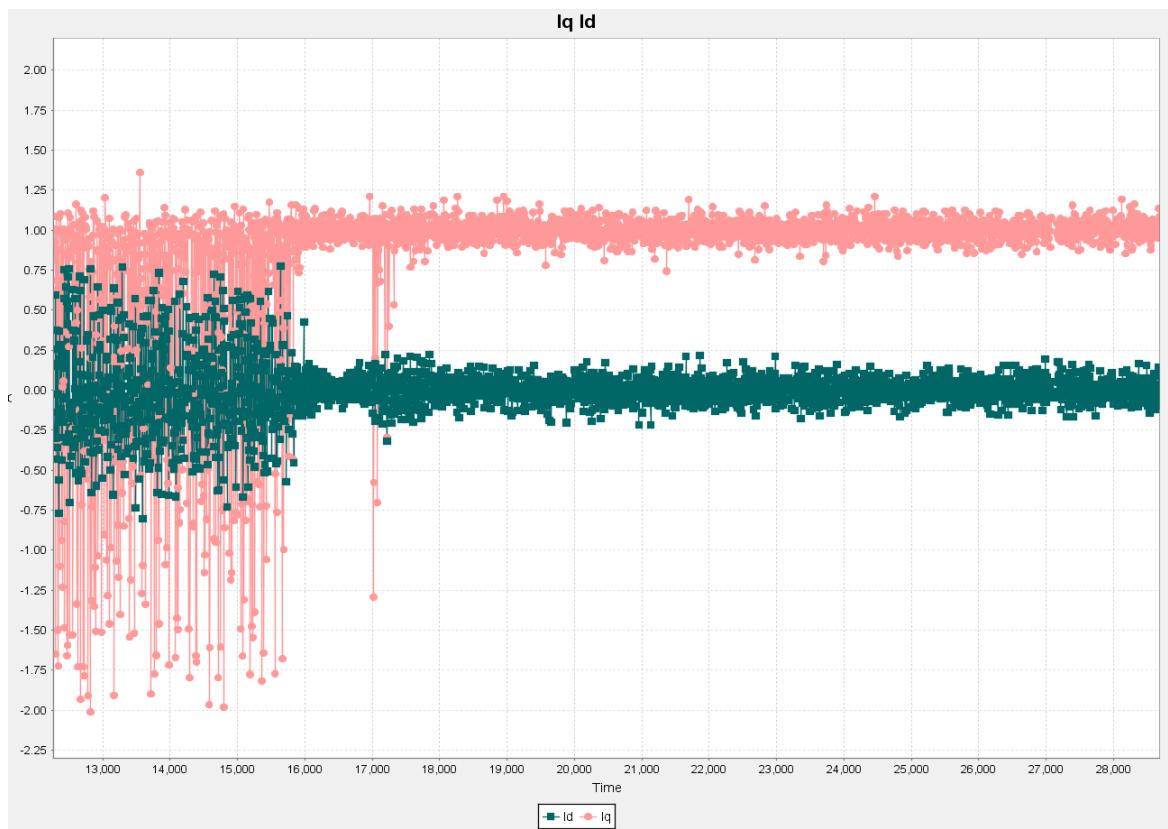
Rysunek 32: Przepieg prądu dla wartości amplitudy 0.5A z obciążeniem



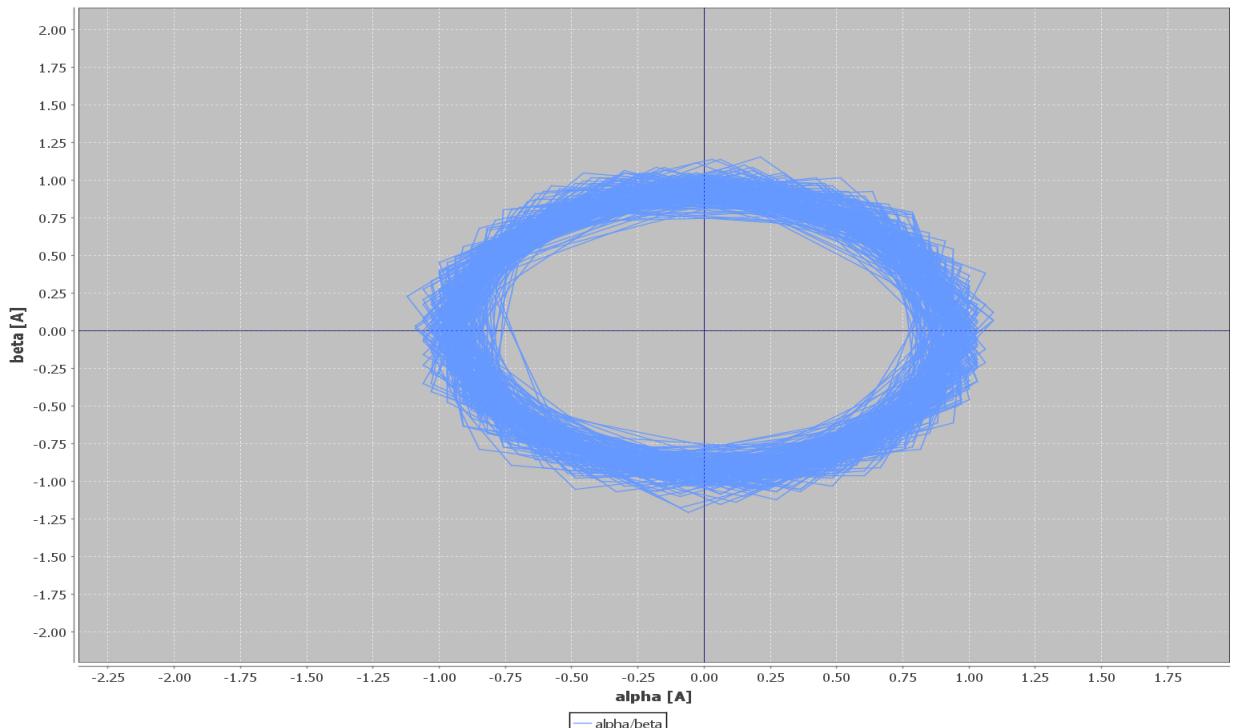
Rysunek 33: Przepieg prądu dla wartości amplitudy 1A bez obciążenia



Rysunek 34: Przepieg prądu dla wartości amplitudy 1A z obciążeniem



Rysunek 35: Przebieg składowej  $I_d$ ,  $I_q$  dla wartości zadanej 1A



Rysunek 36: Hodogram prądu w układzie współrzędnych alfa, beta dla wartość zadanej 1A

Z pomiarów wynika, że dla silnika działającego bez obciążenia przebieg prądu jest odkształcony i

mocno odbiega od kształtu sinusoidy. Moment elektromagnetyczny jest iloczynem strumienia strumienia elektromagnetycznego wirnika skojarzonego ze stojanem, prądu i kosinusa kąta między polem stojana i wirnika. Przy braku obciążenia i osiągnięciu zadanej prędkości obrotowej, prąd utrzymuje małą wartość

## Spis rysunków

1	Przebiegi siły elektromotorycznej E, prądu I i momentu T dla jednej fazy dla: a) silnika PMSM, b) silnika BLDC [14]	4
2	Stojan silnika BLDC [6]	4
3	Wirnik silnika BLDC [6]	4
4	Uproszczony schemat układu sterowania i zasilania silnika [3]	5
5	Schemat silnika synchronicznego z magnesami trwałymi	6
6	Algorytm FOC [5]	8
7	Transformata Clark'a [4]	8
8	Transformata Park'a [4]	9
9	Transformacje w algorytmie FOC [5]	9
10	Wektory w przestrzeni stanu i podział na sektory [5]	10
11	Maksymalna długość wektora [5]	10
12	Generowanie wektora $V_x$ [8]	11
13	Sekwencja generowania wektora referencyjnego	11
14	Napęd z silnikiem BLDC	12
15	Silnik BLDC	14
16	Zestaw rozwojowy STM32 B-G431-ESC1 [13]	15
17	Zestaw rozwojowy STM32 Nucleo F746ZG [11]	16
18	Pomiar prądu [12]	16
19	Wzmacnianie mierzonego sygnału [12]	17
20	Schemat regulatora PID biblioteki CMSIS-DSP [1]	17
21	Synchronizacja sygnału PWM z wyzwalaniem przerwania od przetwornika ADC	18
22	Model napędu silnika BLDC	19
23	Schemat układu komunikacji	19
24	Interfejs użytkownika	20
25	Interfejs użytkownika	21
26	Przebiegi wygenerowanych sygnałów na podstawie trzech sygnałów sinusoidalnych	21
27	Nastawy regulatorów PID	22
28	Przepieg prądu dla wartości amplitudy 0.3A bez obciążenia	22
29	Przepieg prądu dla wartości amplitudy 0.3A z obciążeniem	23
30	Przepieg prędkości obrotowej dla cyklicznego obciążania i obciążania wału silnika dla prędkości zadanej 2500 obr/min i amplitudy prądu 0.3A	23
31	Przepieg prądu dla wartości amplitudy 0.5A bez obciążenia	24
32	Przepieg prądu dla wartości amplitudy 0.5A z obciążeniem	24
33	Przepieg prądu dla wartości amplitudy 1A bez obciążenia	25
34	Przepieg prądu dla wartości amplitudy 1A z obciążeniem	25
35	Przebieg składowej $I_d$ , $I_q$ dla wartości zadanej 1A	26
36	Hodogram prądu w układzie współrzędnych alfa, beta dla wartość zadanej 1A	26

## Literatura

- [1] CMSIS Version 5.7.0 Software Interface Standard for Arm Cortex-based Microcontrollers. [https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/group\\_\\_PID.html](https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/group__PID.html), 2008. [Online; accessed 01-07-2020].
- [2] Mokhtar Bouanane, Mohamed Bourahla, and Madjid Guerouad. Design and implementation of three-phase ipm inverter based on svpwm for ac motor applications using dspic30f4011. *Przegląd Elektrotechniczny*, 95, 2019.
- [3] Arkadiusz Domoracki and Krzysztof Krykowski. Silniki bldc-klasyczne metody sterowania. *Zeszyty Problemowe–Maszyny Elektryczne*, 72, 2005.

- [4] Texas Instruments Europe. Field orientated control of 3-phase ac-motors. *Literature Number: BPRA073*, 1998.
- [5] Charles Frick. Brushless dc motors introduction for next-generation missile actuation systems outline. *Analog Devices, Inc.*, 6, 2018.
- [6] Zbigniew Goryca. Metody sterowania silników bldc. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, (66):32–47, 2012.
- [7] Krzysztof Krykowski. *Silniki PM BLDC*. Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2015.
- [8] Ahmed A Mansour. Novel svpwm based on first order equation. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2(2):197–206, 2015.
- [9] Jacek Przepiorkowski. Troj fazowy falownik wektorowy zestaw ewaluacyjny tms320f28035 podstawy teoretyczne. *SKLEP.AVT.PL ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA*, 4, 2010.
- [10] STMicroelectronics. *STM32F745xx, STM32F746xx*, 2016.
- [11] STMicroelectronics. *UM1974, User manual, STM32 Nucleo-144 boards*, 2017.
- [12] STMicroelectronics. *AN5397, Amplification network schematic for bipolar current sensing*, 2019.
- [13] STMicroelectronics. *UM2516 User Manual, Electronic speed controller Discovery kit for drones with STM32G431CB*, 2020.
- [14] Konrad Zajkowski and Stanisław Duer. Sterowanie prędkością obrotową silnika bezszczotkowego bldc. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 14:303–306, 2013.