



Politechnika Szczecińska
Instytut Elektrotechniki
Zakład Maszyn i Napędów Elektrycznych

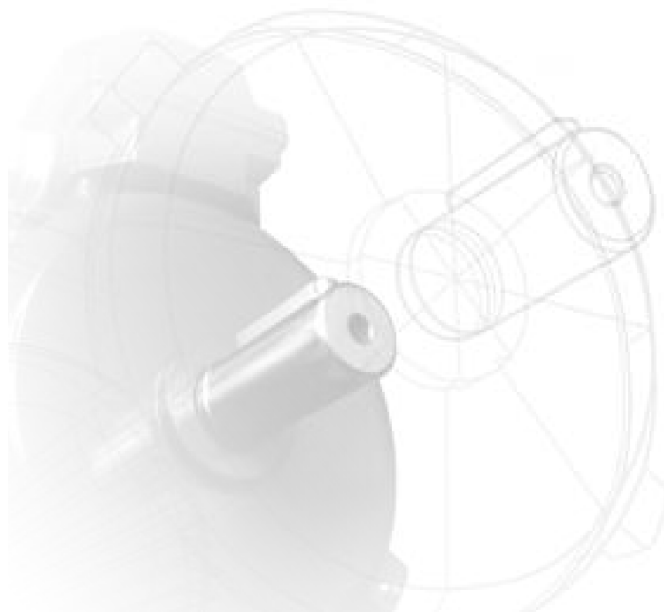


Laboratorium

Automatyki Napędu Elektrycznego

SILNIK BEZSZCZOTKOWY PRĄDU STAŁEGO BLDC

część I



Szczecin 2006

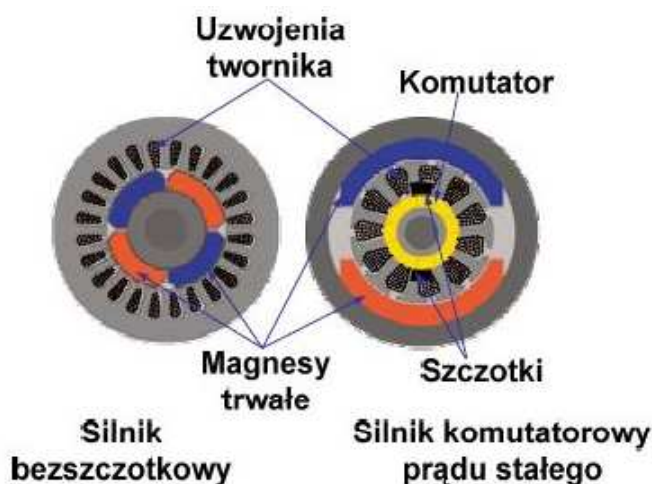
I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia BLDC część I jest zapoznanie się z własnościami regulacyjnymi silników BLDC jak również z typowymi układami sterowania tego typu maszyn. Ćwiczenie pozwoli poznać się z ideą elektronicznej komutacji, charakterystykami maszyn BLDC, da możliwość analizy pracy układu przy sterowaniu przy stałym współczynniku modulacji PWM mostka 6T. Na podstawie dokumentacji wyznaczone zostaną dominujące stałe czasowe maszyny.

II. Wstęp teoretyczny

Wraz z rozwojem elektroniki i energoelektroniki typowe wymagania stawiane przekształtnikom i ich układom sterowania są coraz większe. Podstawowym kryterium stawianym przekształtnikom oraz układom zasilania jest zapewnienie przez przekształtnik odpowiedniej jakości energii elektrycznej dostarczanej do odbiornika, stabilnej wartości napięcia oraz wydajności prądowej. Ponadto wymaga się, by urządzenie było możliwie bezawaryjne i odporne na uszkodzenia, mogące wystąpić w trakcie pracy. Nie są to jednak jedyne kryteria. Zadania, stawiane przed urządzeniami tego typu są coraz bardziej skomplikowane ze względu na wymagające obiekty sterowania.

Oprócz szybkiego rozwoju energoelektroniki prawie jednocześnie udało się dokonać przełomu w technologii tworzenia magnesów trwałych o bardzo wysokiej wydajności.



Rysunek 1: Poglądowa budowa komutatorowego i bezszczotkowego silnika prądu stałego ze wzbudzeniem od magnesów trwałych
(Źródło: Bartosz Śliwa, Marcin Wojtkun: „Sterowanie przekształtnika energoelektronicznego procesorem DSP”, praca dyplomowa magisterska, ZMiNE 2006)



Konstrukcja silnika bezszczotkowego, wzbudzanego magnetoelektrycznie, jest odwrotna w stosunku do konstrukcji silnika komutatorowego prądu stałego z uwagi na to, że magnesy trwałe (wzbudzenie) umieszczone są na wirniku, natomiast uzwojenie twornika znajduje się w stojanie (Rysunek 1). W rzeczywistości konstrukcji tego typu silników jest wiele, co pozwala spotkać się z różną ilością par biegunów, ilością faz i ich połączeń. Bezszczotkowy silnik prądu stałego (BLDC) jest układem w którym wysterowanie kluczy energoelektronicznych (komutacja) odbywa się sekwencyjnie w funkcji kąta położenia wirnika. Najczęściej w tym celu stosuje się przekształtnik energoelektroniczny formującym prąd lub napięcie wyjściowe o określonej amplitudzie i częstotliwości, związane z funkcją kąta położenia wału.

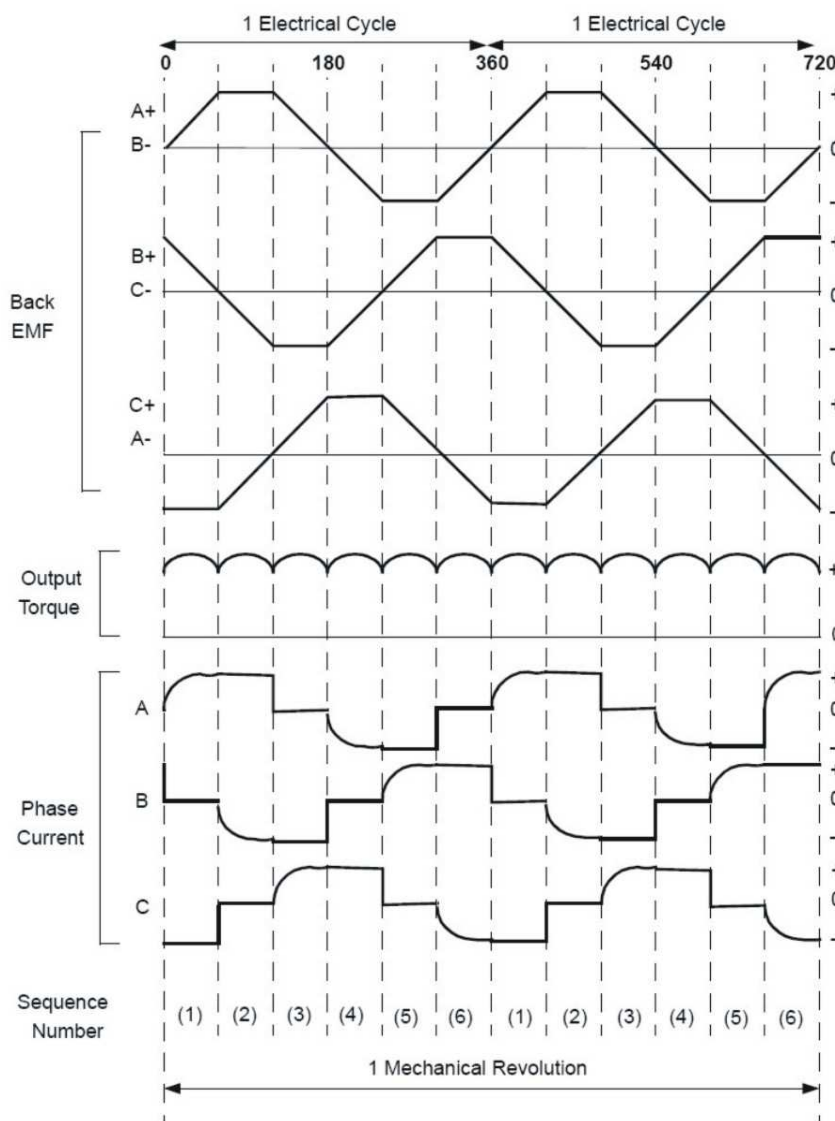
Główne zalety silnika bezszczotkowego w porównaniu z innymi silnikami to:

- bardzo duża sprawność
- liniowa charakterystyka mechaniczna
- wysoki stosunek momentu rozwijanego do gabarytów
- brak komutatora
- bardzo mała inercja wirnika

Silnik BLDC różni od pozostałych konstrukcji maszyn wzbudzonych magnesami trwałymi (np. PMSM – maszyna synchroniczna wzbudzona magnesami trwałymi) przede wszystkim taki układ części wzbudzenia i magnetowodu, iż kształt napięć indukowanych w poszczególnych fazach jest trapezoidalny (Rysunek 2). Przyjmując połączenie w gwiazdę oraz oznaczenie uzwojeń (faz) zgodnie z Rysunkiem 2.3, można przedstawić przebiegi prądów, sił elektromotorycznych w poszczególnych fazach, a także momentu wyjściowego maszyny w funkcji kąta obrotu wału, wyjaśniając przy tym ideę komutacji elektronicznej w silniku BLDC. Przedstawione na Rysunku 2 przebiegi wskazują, że na jeden okres mechaniczny przypadają 2 okresy elektryczne, a więc silnik, który posłużył jako przykład wyjaśniający zasadę działania posiada 2 pary biegunów.

Z zamieszczonych rysunków wynika, że istnieje 6 stanów (sekwencji) komutatora elektronicznego na każdy okres elektryczny maszyny. Moment wyjściowy jest wprost proporcjonalny do wartości prądu fazowego, a więc typowa zależność obowiązująca maszyny prądu stałego jest zachowana. Każdy zawór (klucz) komutatora elektronicznego przewodzić więc powinien przez 120° elektrycznych, ponadto w każdej chwili (poza momentami przełączeń) przewodzi jeden klucz „do-

datni” (górných gałęzi mostka) i jeden „ujemny” (dolnych gałęzi mostka, Rysunek 4).



Rysunek 2: Typowe przebiegi napięć międzyfazowych, prądów oraz momentu obrotowego maszyn BLDC

(Źródło: Microchip datasheet *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>)

Równanie momentu elektromagnetycznego maszyny można opisać poniższą zależnością: [Bodora A.: *Nowa topologia komutatora elektronicznego, umożliwiająca dwustrefową pracę silnika PMBDC*. Autoreferat pracy doktorskiej.]

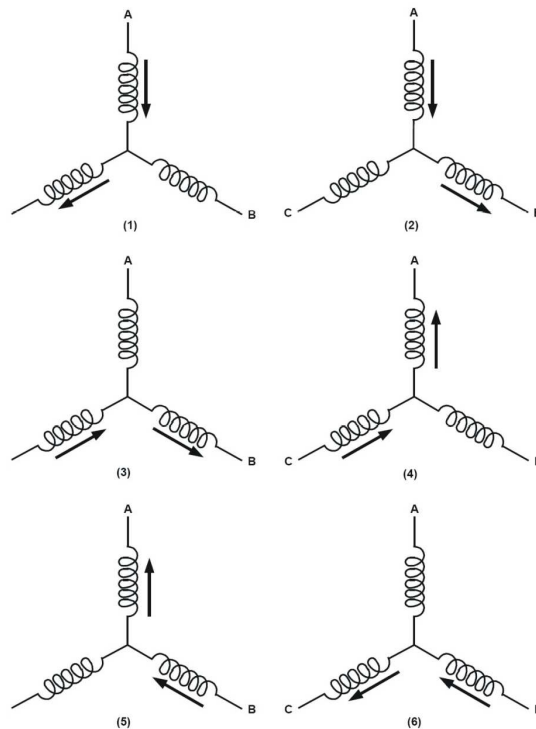
$$M_e = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c), \quad [1]$$

gdzie: ω_m – prędkość mechaniczna, e_x – siła elektromotoryczna poszczególnej fazy, i_x – prąd wzbudzenia uzwojenia poszczególnej fazy.

Po dokonaniu dalszych przekształceń otrzymać można również:

$$M_e = \frac{-2E}{\omega_m} \cdot i_c \quad [2]$$

Ze wzoru 2 wynika, że podczas pracy maszyny, znając jej parametry techniczne, moment można oszacować za pomocą wartości chwilowej prądu jednej fazy (która akurat bierze aktywny udział w budowaniu momentu). Występowanie zjawiska chwilowych zmian momentu elektromagnetycznego o ujemnym znaku (powyżej pewnej prędkości obrotowej) powoduje ograniczenie średniej wartości momentu w zakresie wyższych prędkości obrotowych.



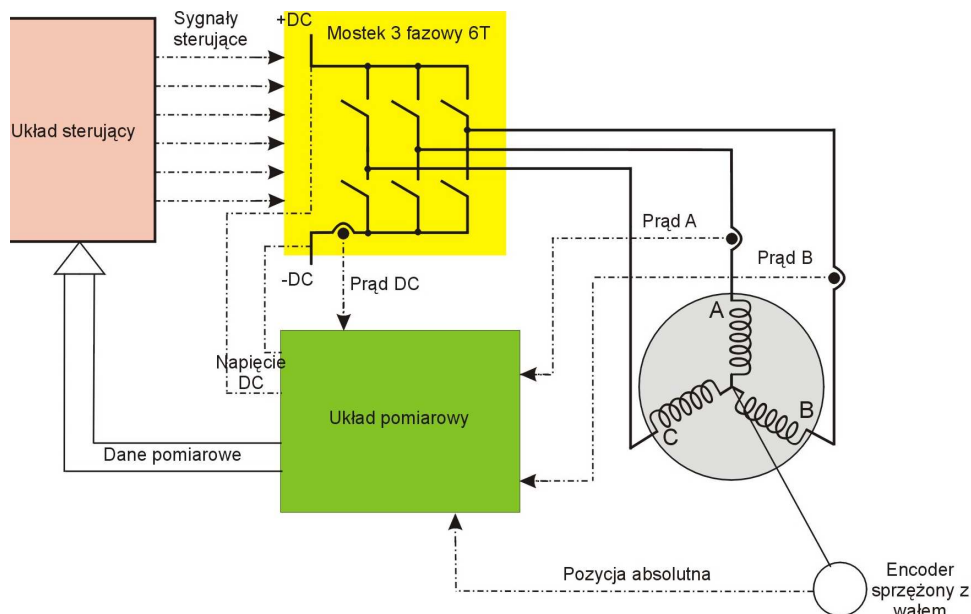
Rysunek 3: Typowe przebiegi napięć międzyfazowych, prądów oraz momentu obrotowego maszyn BLDC

(Źródło: Microchip datasheet *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>)

Stanowisko laboratoryjne dostępne na ćwiczeniu jest efektem pracy Bartosza Śliwy oraz Marcina Wojtkuna: „Sterowanie przekształtnika energoelektronicznego procesorem DSP”, w ramach pracy dyplomowej magisterskiej, ZMiNE 2006. Budowę obwodu zasilania prezentuje Rysunek 4.

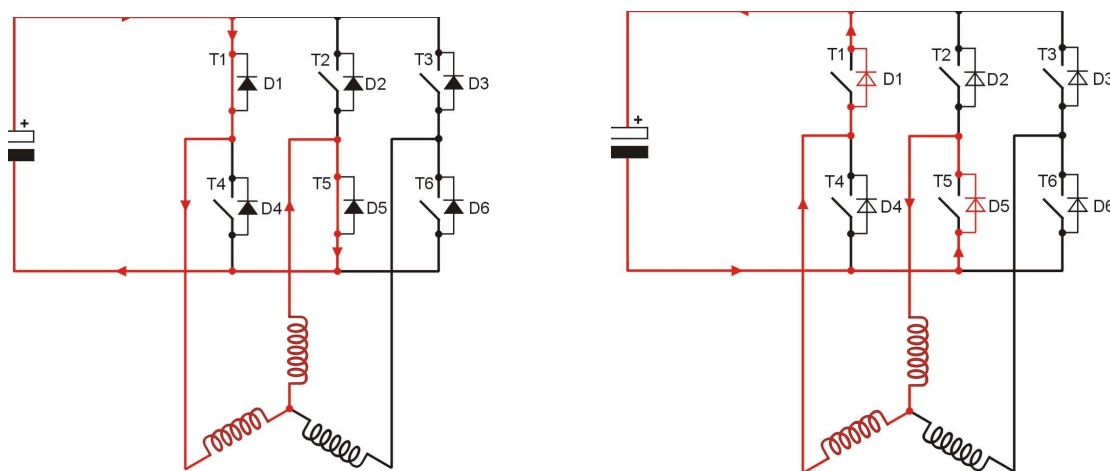
Do konstrukcji obwodu mocy wykorzystano mostek tranzystorowy 6T oparty o tranzystory IGBT. Dwa z sześciu stanów komutacji tak skonstruowanego układu

prezentuje Rysunek 5, jeden ze stanów prezentuje typowy stan przewodzenia tranzystorów, kolejny stan przewodzenie diod.



Rysunek 4: Idea układu sterująco-zasilającego stanowiska.

(Źródło: Bartosz Śliwa, Marcin Wojtkun: „Sterowanie przekształtnika energoelektronicznego procesorem DSP”, praca dyplomowa magisterska, ZMiNE 2006)

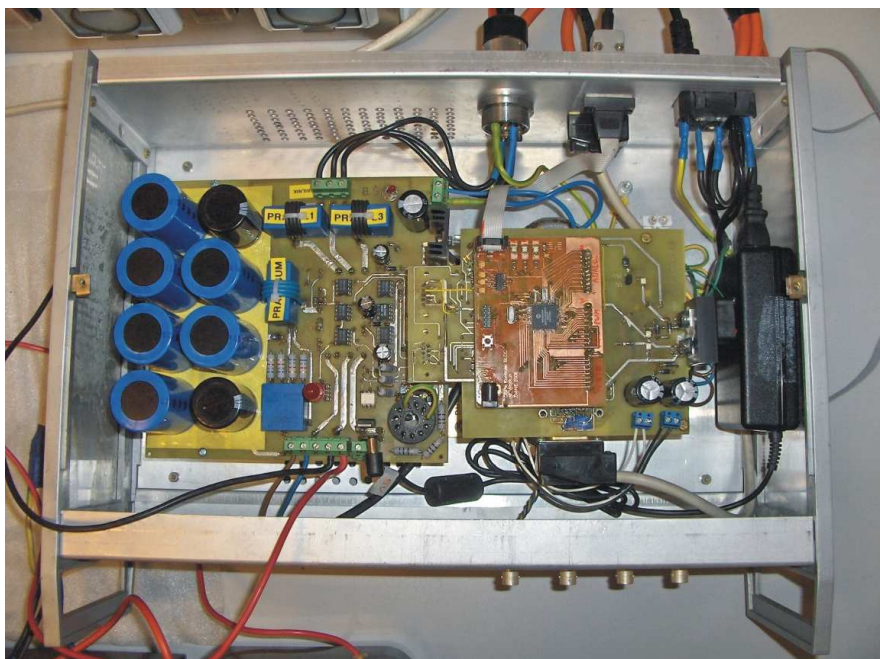


Rysunek 5: Przykładowe stany komutacji układu.

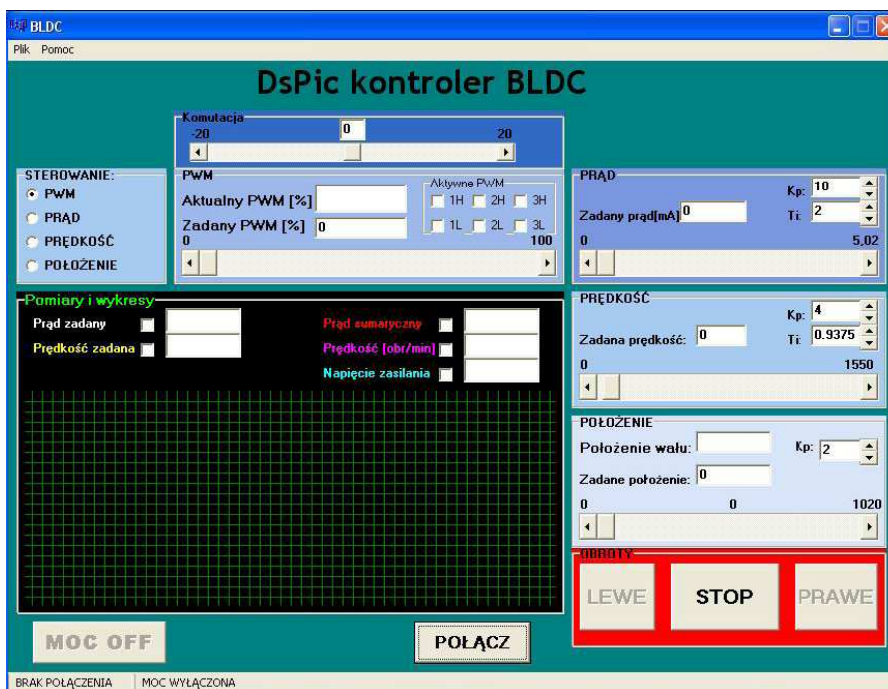
(Źródło: Bartosz Śliwa, Marcin Wojtkun: „Sterowanie przekształtnika energoelektronicznego procesorem DSP”, praca dyplomowa magisterska, ZMiNE 2006)

Całość układu sterowania oparta jest o procesor sygnałowy serii 30f6010 firmy Microchip, jako czujnika położenia wału użyto enkodera absolutnego MAK50-10-1224 GRA opartego o kod Gray’a. Skonstruowany układ sterowania prezentuje Zdjęcie 1. Dodatkowo stanowisko wyposażone jest w graficzny interfejs użytkownika umożliwiający zmianę parametrów oraz trybu pracy układu na stanowisku

laboratoryjnym (Rysunek 6, Załącznik 2). Całość stanowiska uzupełnia niezbędny osprzęt pomiarowo-diagnostyczny.

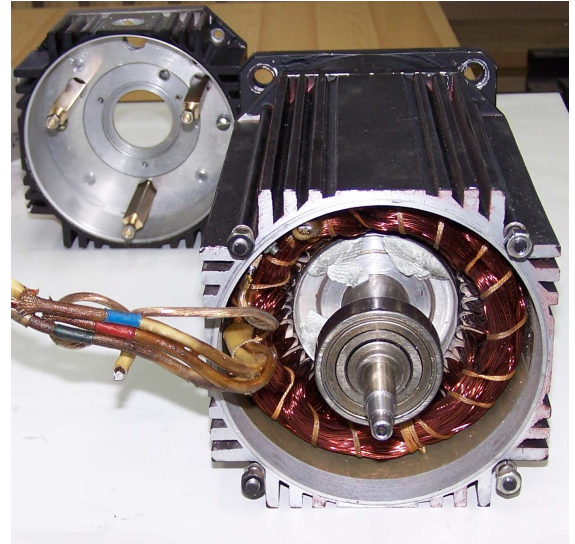
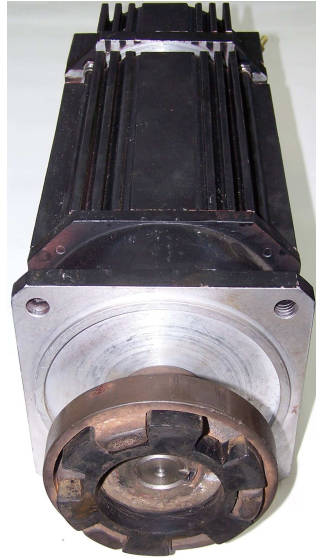


Zdjęcie 1: Budowa całości układu sterowania silnikiem BLDC.
(Źródło: Bartosz Śliwa, Marcin Wojtkun: „Sterowanie przekształtnika energoelektronicznego procesorem DSP”, praca dyplomowa magisterska, ZMiNE 2006)

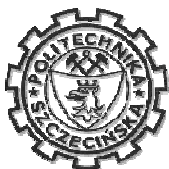


Rysunek 6: Panel operatora układu sterowania.
(Źródło: Bartosz Śliwa, Marcin Wojtkun: „Sterowanie przekształtnika energoelektronicznego procesorem DSP”, praca dyplomowa magisterska, ZMiNE 2006)

Na stanowisku laboratoryjnym znajduje się silnik rodzimej produkcji ZELMOT typ: RTMct 165-14 (dane techniczne: Załącznik 1). Wygląd maszyny prezentuje Zdjęcie 2.



Zdjęcie 2: Testowana maszyna ZELMOT RTMct 165-14



III. Przebieg ćwiczenia

III.1.

Uzupełnij brakujące przebiegi na następnej stronie. Czy można wyznaczyć sekwencję przełączeń na innej podstawie niż sygnał czujnika położenia wału maszyny

III.2.

Na podstawie danych technicznych maszyny (załącznik 1) oraz wyników pomiarów (tabelka poniżej) wyznacz stałe czasowe maszyny. Która z nich jest dominująca?

Rezystancja międzyzaciskowa A-B	R_{A-B} [m Ω]	217
Rezystancja międzyzaciskowa A-B	R_{A-B} [m Ω]	217
Rezystancja międzyzaciskowa A-B	R_{A-B} [m Ω]	217
Impedancja średnia	Z_{SR} [m Ω]	867

Przypomnienie:

Impedancja obwodu RL: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, reaktancja indukcyjna
 $X_L = \omega L = 2\pi fL$

Pomiaru impedancji dokonano przy 50Hz.

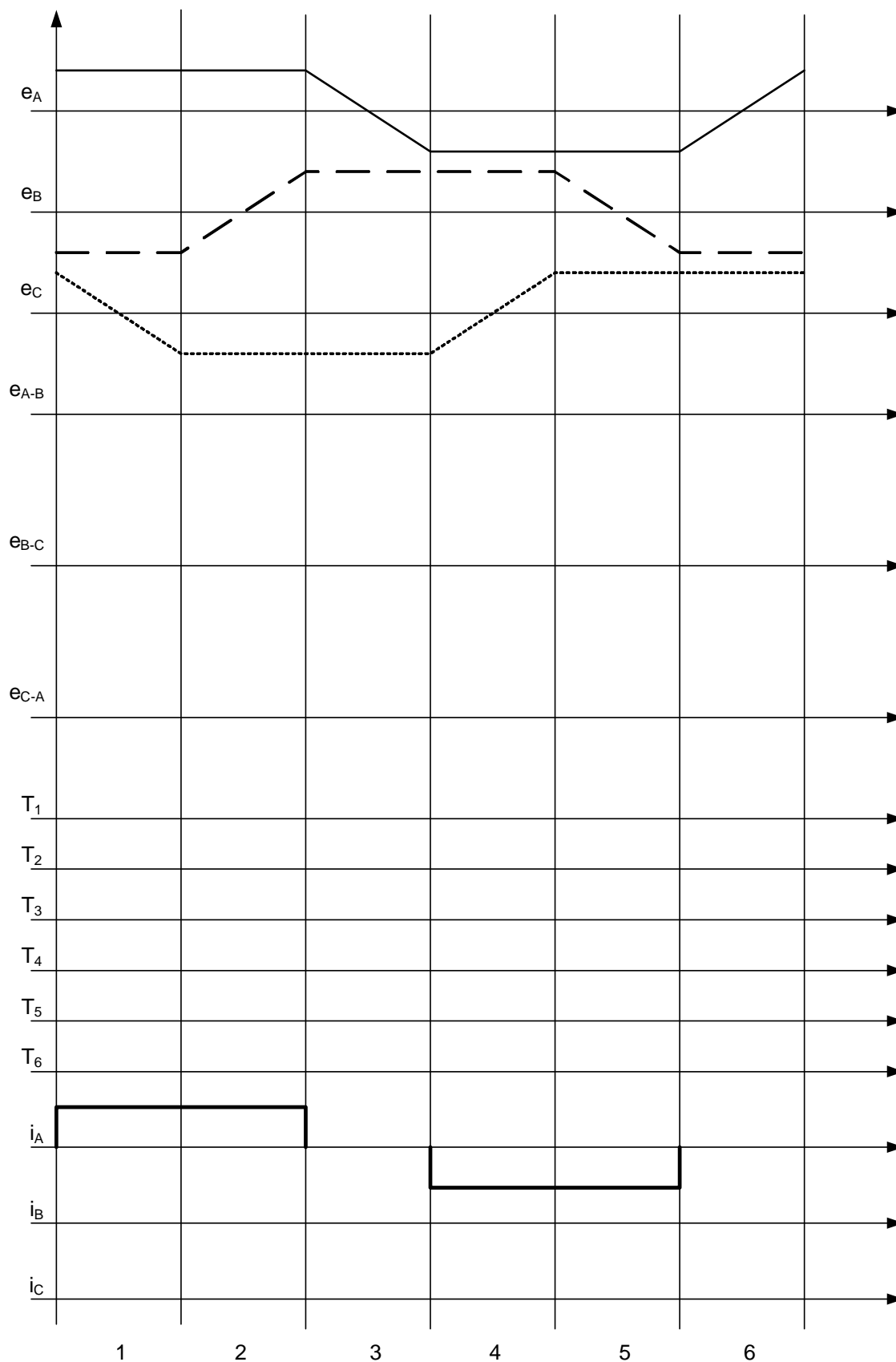
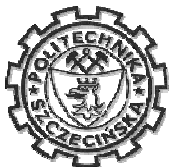
Elektryczna stała czasowa: $T_E = \frac{L_{\text{zast}}}{R_{sr}}$

Mechaniczna stała czasowa: $T_M = \frac{J \cdot \omega_n}{M_n}$, gdzie: J – moment bezwładności

wirnika, ω_n – kątowna, nominalna prędkość obrotowa, M_n – nominalny moment obrotowy maszyny.

III.3

Po uruchomieniu modułu sterowania i panelu operatora (w obecności prowadzącego, bez podania napięcia zasilającego) określić ilość sekwencji załączeń kluczy, ile par biegunów ma maszyna? Po podaniu napięcia zasilającego (w obecności prowadzącego) uruchomić moduł „PWM”. Zmieniać nastawy zadanego współczynnika wypełnienia analizując wpływ na zachowanie maszyny. Obserwując przebiegi prądów fazowych zmieniać kąt komutacji maszyny.



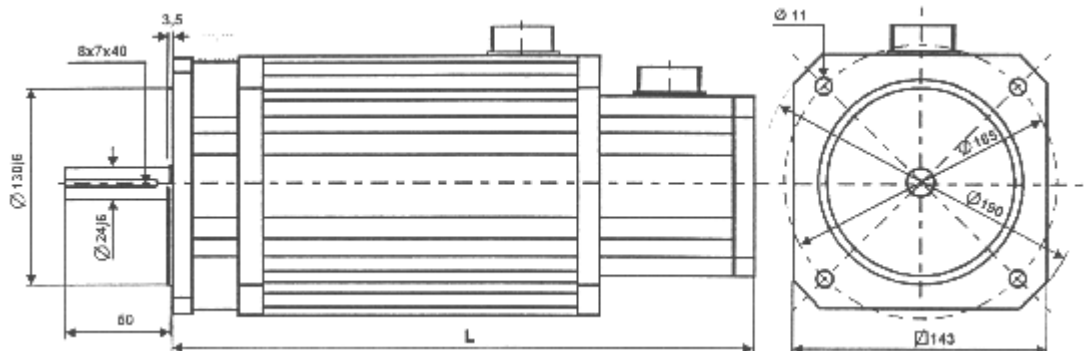


IV. Wymagania dotyczące sprawozdania

W sprawozdaniu umieścić należy:

1. Schemat stanowiska badawczego
2. Obliczenia z punktu III.II.
3. Analiza i przedstawienie graficzne wyników pomiarów z punktu III.III, na podstawie danych zebranych na ćwiczeniu podać krótki opis sposobu sterowania maszynami BLDC. Dlaczego przy sterowaniu przy stałym współczynniku PWM podczas hamowania wału prąd maszyny rośnie? Jak wpływa przesunięcie kąta komutacji z pozycji neutralnej? Jeśli na wale maszyny zamocowano czujnik Gray'a o 10-bitowej rozdzielczości, to z jaką dokładnością (w stopniach mechanicznych oraz elektrycznych) można określić położenie wału maszyny?

Załącznik 1 Dane techniczne badanej maszyny



Lp	Parametr	Sy- mbo- l	Jed- nostka	RTMct 165-10	RTMct 165-14	RTMct 165-18	RTMct 165-23	RTMct 165-27	RTMct 165-30	Tole- rancja %
1	Moment długo- trwały	M _D O	Nm	10	14	18	23	27	30	
2	Max. prędkość obrotowa *)	n	rpm	3000	3000	3000	3000	3000	3000	
3	Max. Napięcie pracy *)	U	VDC	540	540	540	540	540	540	
4	Max. moment (impuls)	M _m	Nm	35	49	63	80,5	94,5	105	
5	Max. prąd (im- puls)	I _m	A	30,5	42,6	54,8	69	82	85,5	
6	Stała momentu	K _T	Nm/A	1,15	1,15	1,15	1,17	1,15	1,23	±10
7	Stała napięcia	K _E	V/1000 min ⁻¹	120,5	120,5	120,5	123,2	120,5	129	±10
8	Moment bez- władności	I	kgm ² 10 ⁻⁴	14,3	19,5	21,4	29,3	32,4	37	
9	Długość **)	L	mm	295	325	355	385	415	445	
10	Masa	Q	kg	11,8	14,5	17,3	20,0	23	26	

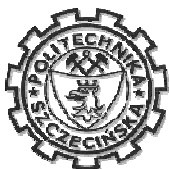
*) - inne wartości do uzgodnienia **) - wymiar dla wersji z hamulcem i bez hamulca
 -Silnik z uzwojeniem trójfazowym, 6-cio biegunowym. Wirnik z magnesami trwałymi z ziem-
 rzadkich o prostokątnym rozkładzie pola (napięcie indukowane silnika o kształcie trapezo-
 idalnym) z wbudowaną prądnicą tachometryczną, bezszczotkową prądu stałego z halotrono-
 wymi czujnikami położenia wirnika do sterowania układem komutacji elektronicznej.
 Stała napięcia prądnicy 3,3V/1000rpm *)

-Izolacja klasy F

-Stopień ochrony IP54 *)

Wyposażenie dodatkowe:

1. Hamulec zwalniany elektrycznie 12Nm, 24VDC (Przy zamontowanym hamulcu masa silni-
 ka wynosi Q+1,1 kg, mom.bezwładności: I+3,6*10⁻⁴kgm²)
2. Przetwornik: obrotowo impulsowy, kodowy, bezstykowy transformator położenia kąтового
 (rezolwer).
3. Inne wyposażenie po uzgodnieniu z producentem



Załącznik 2 Opis programu interfejsu użytkownika

Program graficznego interfejsu użytkownika napisano w środowisku C++ Builder 6.0 firmy Borland, na licencji studenckiej. **Panel operatorski:** Panel operatorski stworzono do komunikacji z przekształtnikiem za pomocą interfejsu RS232. Program podzielono na osobne bloki symbolizujące struktury regulatorów: PWM, prądu, prędkości oraz położenia. Do wyboru odpowiedniego regulatora służy moduł "STEROWANIE". Gdy zostanie wybrany regulator pozostałe bloki stają się nieaktywne. W przekształtniku zastosowano kaskadową strukturę regulacji w której występuje interakcja nastaw regulatorów. Po pierwszym włączeniu programu wizualizacji wyświetlane są optymalne nastawy dobrane w trakcie konstruowania urządzenia. Zmiany nastaw regulatorów oraz wartości zadanych wysyłane są niezwłocznie do procesora sygnałowego. Do połączenia interfejsu z przekształtnikiem służy przycisk "POŁĄCZ", po jego naciśnięciu ustawiane są parametry portu RS232 komputera do komunikacji z przekształtnikiem, wysyłane jest zadanie resetu przekształtnika oraz uaktywniane są przyciski wyboru obrotów i włącznika mocy. Po wykonaniu opisanej procedury zmienia swa funkcje oraz nazwę na "ODŁĄCZ". Ponowne wciśnięcie spowoduje wyłączenie przycisków wyboru obrotów , odłączy obwód mocy oraz zmieni swoją funkcje na "POŁĄCZ". Do włączenia obwodu mocy służy przycisk "MOC ON". Program wyposażony jest w dodatkowy moduł sterowaniem kąta komutacji. Za jego pomocą możemy programowo przesunąć początek komutacji w zakresie od -20 do 20 impulsów czujnika położenia. Program wyposażono w możliwość wizualizacji przebiegów prądu sumarycznego, napięcia, prędkości obrotowej oraz wartości zadanych.

Panel zmiany ustawień: Panel ustawień wywoływany jest z poziomu menu panelu operatorskiego. Za jego pomocą mamy wpływ na :

- . Zakres PWM od 0 do 100%
- . Maksymalny prąd zadany od 1[A] do 10[A]
- . Maksymalna prędkość zadana od 10 do 2500[obr/min]
- . Maksymalna wartość położenia wyrażona w stopniach od 0 do 3600°
- . Prąd powyżej, którego procesor sygnałowy wyłącza klucze, nie przerywając wywoływania programu. W zakresie od 1[A] do 10[A]
- . Prąd powyżej, którego procesor sygnałowy wyłącza cały obwód mocy przerywając wywoływanie programu. W zakresie od 2[A] do 20[A]
- . Wybór portu RS232 : COM1 lub COM2
- . Reset procesora sygnałowego