

**Laboratorium Automatyki Napędu Elektrycznego**

**Napęd z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego**

**(BLDC)**

Wersja 2.0

Politechnika Gdańska 2004

## 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDC). układu napędowego silnika klatkowego w układzie z orientacją względem wektora przy wykorzystaniu przekształtnika AMT-030 z mikroprocesorowym systemem sterowania SH65.

Układ napędowy składa się z silnika BLDC o mocy 1.1kW i obciążenia w postaci maszyny BLDC pracującej na rezystor. Pracą przemiennika częstotliwości steruje układ mikroprocesorowy SH65 v3 z procesorem sygnałowym ADSP21065L i układem logiki programowalnej Altera FLEX6016. Oprogramowanie narzędziowe procesora sygnałowego VisualDSP umożliwia przygotowanie i kompilację programów sterujących przemiennikiem. Program ładowany jest do procesora za pomocą konsoli operatora, która umożliwia także zmianę parametrów sterowania, rejestrację i wizualizację przebiegów

## 2. WSTĘP

Silniki elektryczne w chwili obecnej można zaliczyć do najbardziej popularnych maszyn stosowanych zarówno w przemyśle, transporcie, jak i w życiu codziennym. Rozwój nauki oraz wykorzystanie najnowszych technologii wpływa na powstawanie coraz to nowych rodzajów i typów maszyn. Do jednych z nich należą silniki z magnesami trwałymi, wśród których można wyróżnić:

- silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM),
- bezszczotkowe silniki prądu stałego (BLDC).

Podział ten wiąże się ściśle z ich konstrukcją gdyż silniki o **sinusoidalnym** rozkładzie pola są najczęściej sterowane jako silniki synchroniczne, natomiast

o **trapezoidalnym** rozkładzie pola jako silniki prądu stałego.

Silniki bezszczotkowe prądu stałego znane są przede wszystkim z układów niedużej mocy. Najczęściej stosowane są w: urządzeniach komputerowych (dyski twarde, wentylatorki chłodzące), sprzęcie medycznym, biurowym (np. drukarki), a także w sprzęcie gospodarstwa domowego (lodówki, klimatyzacje). Rozwój technologii elementów energoelektronicznych spowodował zwiększone zainteresowanie tego typu maszynami. Silniki o mocy powyżej 1 kW, znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle, a także w różnego typach napędów pojazdów elektrycznych. Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi projektowane są często w wykonaniu specjalnym ze względu na specyficzne wymagania.

Znaczny wzrost popularności silników BLDC związany jest z wieloma zaletami tego typu maszyn, do których możemy zaliczyć:

- prostą budowę silnika,
- duży stosunek momentu do masy silnika,
- dużą sprawność,
- prosty układ sterowania,
- sterowanie w szerokim zakresie prędkości,
- bardzo dokładną regulację prędkości bez dodatkowych kosztów finansowych,
- wysoki moment rozruchowy,
- niskie koszty obsługi,
- brak szczotek (silnik staje się bardziej cichy, niezawodny, brak zużywania mechanicznego oraz przewodzącego pyłu).

Do najczęściej wymienianych wad tego silnika należą: tętnienia momentu elektromagnetycznego, wysoki koszt magnesów trwałych oraz konieczność stosowania czujników położenia wału, co w znacznym stopniu wpływa na cenę układu napędowego.

W celu zwiększenia niezawodności systemu napędowego z silnikiem BLDC, a także aby wyeliminować niedogodność wynikającą z stosowania czujników położenia wału, prowadzone są badania nad metodami pośredniego określania pozycji wirnika [2] [10] [13].

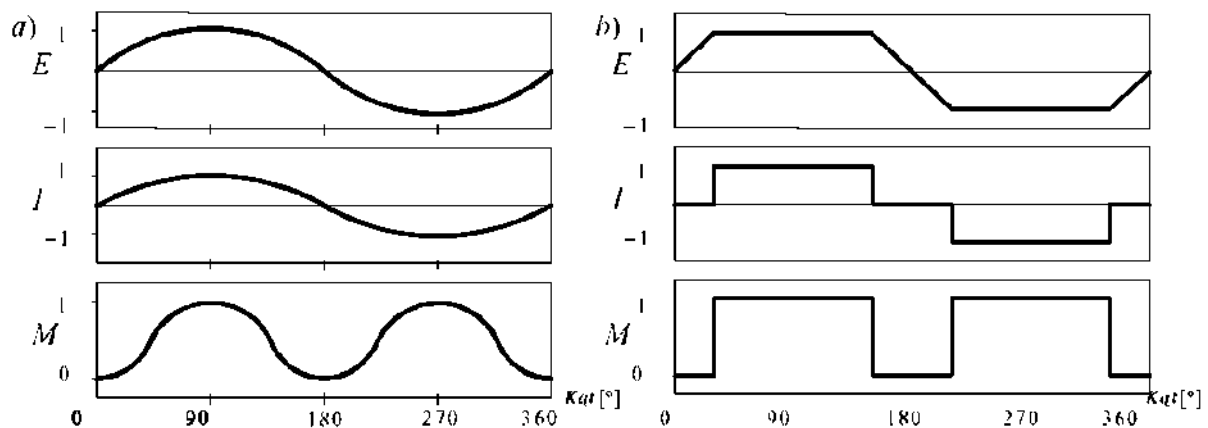
### 3. SILNIK BLDC

#### 3.1. Informacje ogólne

W układach napędowych najczęstsze zastosowanie znajdują dwa typy silników z magnesami trwałymi:

- o trapezoidalnym rozkładzie pola magnetycznego w szczelinie - silnik bezszczotkowy prądu stałego BLDC,
- o sinusoidalnym rozkładzie pola magnetycznego w szczelinie - silnik synchroniczny z magnesami trwałymi PMSM.

Rys. 1. przedstawia różnice pomiędzy wymienionymi powyżej silnikami z magnesami trwałymi. Na wykresach przedstawiono przebiegi siły elektromotorycznej oraz prądu a także momentu elektromagnetycznego dla jednej fazy.



Rys. 1. Przebiegi siły elektromotorycznej E, prądu I oraz momentu T dla jednej fazy, silnik o sinusoidalnym rozkładzie SEM a), typowy silnik o trapezoidalnym rozkładzie SEM o stałych odcinkach na długości 120° b)

Przy trapezoidalnym rozkładzie siły elektromotorycznej silnik najczęściej jest zasilany z trójfazowego falownika napięcia, w którym komutacja kluczy następuje 6 razy na okres. Każda z faz jest załączona przez okres 120 stopni elektrycznych. W danej chwili w przewodzeniu prądu biorą udział dwie fazy silnika, natomiast trzecia pozostaje wyłączona. Zasilane są te fazy które wytwarzają największy moment.

W napędach z silnikami BLDC z trapezoidalnym rozkładem SEM, gdzie jednocześnie przewodzą dwie fazy, a trzecia jest wyłączona, stosowana jest metoda z pomiarem siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie silnika i na tej podstawie wyznaczany jest moment, w którym należy przełączać napięcie zasilające. Metoda ta należy do grupy metod bezczujnikowego sterowania silnikami bezszczotkowymi z magnesami trwałymi.

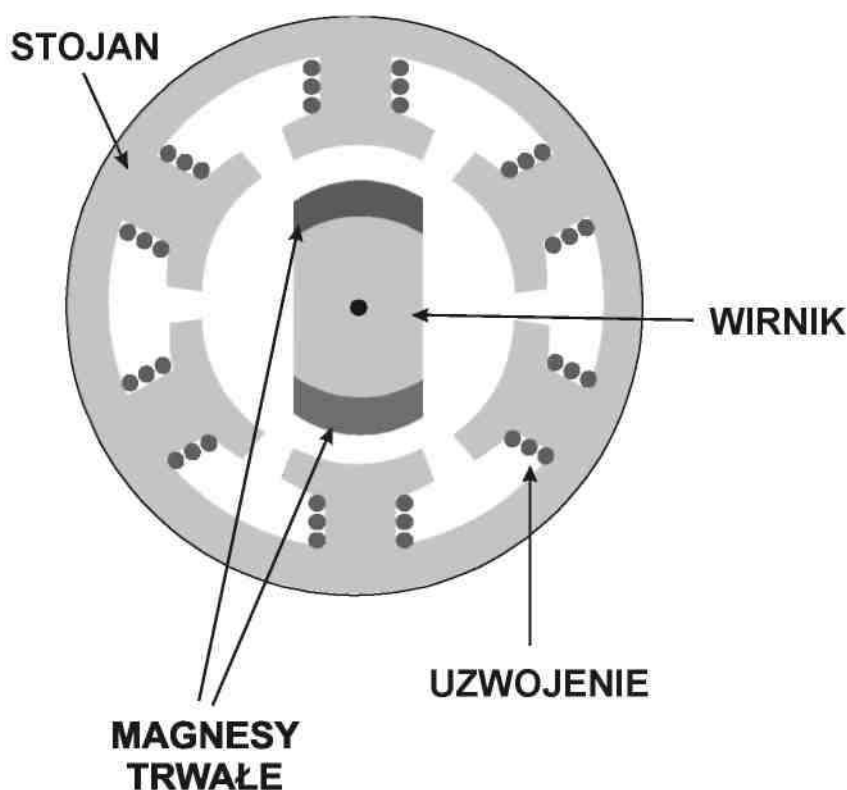
W silniku BLDC moment elektromagnetyczny równy jest sumie momentów generowanych w poszczególnych fazach. Moment elektromagnetyczny silnika BLDC określa zależność:

$$\bar{m}_e = \frac{1}{\omega_r} [i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c],$$

W praktyce, przebiegi siły elektromotorycznej nie są idealnymi przebiegami trapezoidalnymi. Jednocześnie, z uwagi na indukcyjność uzwojeń silnika nie jest możliwe skokowe wymuszenie przepływu fazowego. W rezultacie moment elektromagnetyczny generowany w silniku zawiera składową stałą oraz składowe zmienne.

### 3.2. Budowa silnika

Silniki z magnesami trwałymi, w których siła elektromotoryczna ma przebieg trapezoidalny, nazywane są bezszczotkowymi silnikami prądu stałego. Prosta budowa tego typu silników umożliwia konstruowanie maszyn wysokoobrotowych regulowanych w sposób zbliżony do regulacji silnika prądu stałego. Konstrukcja silnika bezszczotkowego jest konstrukcją odwróconą w stosunku do silnika komutatorowego prądu stałego. Stojan takiego silnika jest wykonany z pakietu blach elektromagnetycznych walcowanych na zimno. Na obwodzie stojana znajdują się bieguny, na których umieszczone są konwencjonalne, koncentryczne uzwojenia. Najczęściej silniki wyposażone są w dwie lub trzy pary biegunów. Uzwojenia umieszczone na przeciwległych biegunach tworzą tzw. „fazy”. Zwiększenie liczby biegunów nie oznacza zwiększenia liczby faz. Na obwodzie wirnika silnika BLDC rozłożone są magnesy trwałe. Aby uzyskać największą sprawność silnika, do budowy wirnika należy użyć magnesów trwałych z domieszką ziem rzadkich. Pociąga to za sobą zwiększenie nakładów finansowych w porównaniu z zastosowaniem konwencjonalnych magnesów. Ogólny schemat silnika BLDC przedstawiony został na rysunku rys.2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny silnika BLDC

### 3.3. Zasada działania silnika

Zasada działania silnika o przebiegu trapezoidalnym jest często odnoszona do działania silnika prądu stałego. Konwencjonalny silnik DC składa się z wirnika, który obraca się w granicach pola magnetycznego stojana zbudowanego z magnesów trwałych. Przez zastosowanie komutatora i szczotek, zmiana znaku prądu jest realizowana automatycznie, co pozwala na obracanie się wirnika w tym samym kierunku. Aby zrealizować obrót silnika bezszczotkowego należy wyeliminować uzwojenie z wirnika. Zostaje to uzyskane poprzez zamianę ról wirnika ze stojanem. Moment obrotowy w bezszczotkowym silniku prądu stałego jest generowany dzięki oddziaływaniu pomiędzy biegunami stojana a magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku. Moment ten określa następujące równanie:

$$T_e = i \cdot y_d + (L_d - L) \cdot i_d \cdot i$$

W powyższym równaniu wykorzystano układ współrzędnych dq. Układ ten jest układem prostokątnym i nieruchomym względem wirnika. Poniżej przedstawiono transformacje z układu współrzędnych abc do układu dq:

$$\psi_\alpha = \frac{\sqrt{2} \left( \psi_{fu} + L_s \cdot i_{su} - \frac{1}{2} (\psi_{fv} + \psi_{fw} + L_s (i_{sv} - i_{sw})) \right)}{\sqrt{3}}$$

$$\psi_\beta = \frac{(\psi_{fv} - \psi_{fw} + L_s (i_{sv} - i_{sw}))}{\sqrt{2}}$$

$$\psi_d = \psi_\alpha \cdot \cos \phi + \psi_\beta \cdot \sin \phi$$

$$\psi_q = -\psi_\alpha \cdot \sin \phi + \psi_\beta \cdot \cos \phi$$

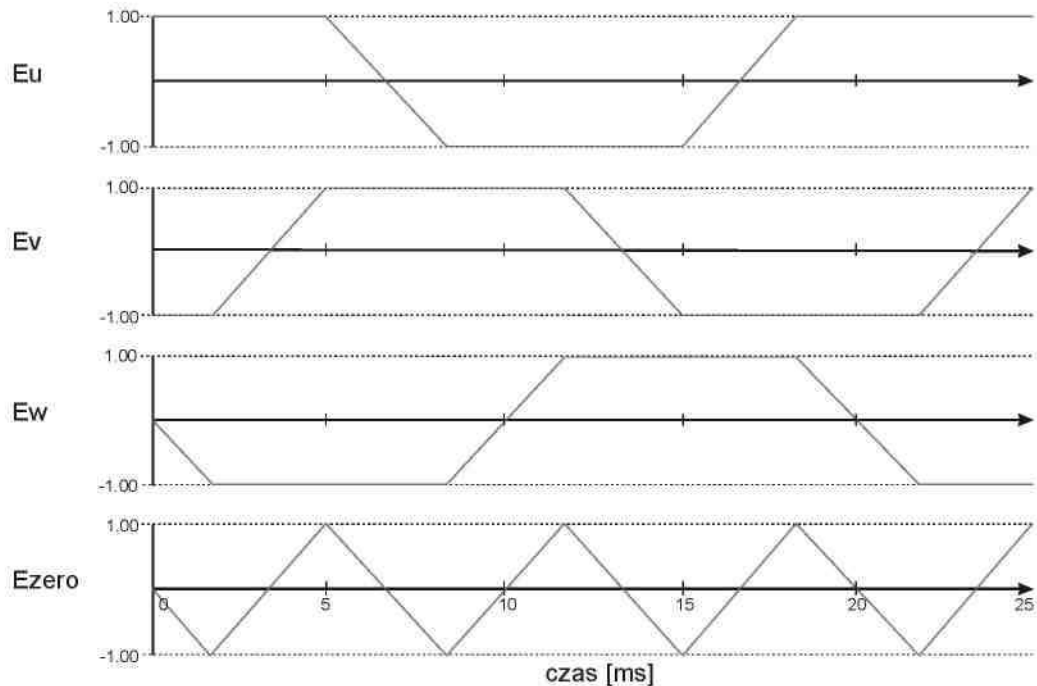
$$i_\alpha = \frac{\sqrt{2} \left( i_{su} - \frac{1}{2} (i_{sv} + i_{sw}) \right)}{\sqrt{3}}$$

$$i_\beta = \frac{i_{sv} - i_{sw}}{\sqrt{2}}$$

gdzie:

- |                                   |                                                               |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $i_{su}, i_{sv}, i_{sw}$          | - prądy w poszczególnych fazach,                              |
| $\psi_{fu}, \psi_{fv}, \psi_{fw}$ | - strumieniami wirnika sprzężonymi z uzwojeniami faz stojana, |
| $L_s$                             | - indukcyjność fazy stojana $L_s = L_d = L_q$ ,               |
| $\phi$                            | - kat położenia wirnika,                                      |
| $\psi_d, \psi_q$                  | - strumienie magnetyczny w osiach d i q.                      |

W danej chwili prąd płynie tylko przez dwie fazy. Zasilane jest to pasmo uzwojenia stojana, którego oś jest prostopadła do osi strumienia wytwarzanego przez magnesy wirnika. Taki sposób sterowania i załączania kluczy falownika jest charakterystyczny dla bezszczotkowych silników prądu stałego. Przebieg sił elektromotorycznych w poszczególnych fazach ma kształt trapezoidalny, co pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi sił elektromotorycznych w fazach silnika oraz w punkcie gwiazdowym

Taki kształt przebiegu siły elektromotorycznej wymusza odpowiednie załączanie kluczy falownika. Kolejne sekwencje załączania kluczy falownika powinny być zmieniane w chwili, gdy przebieg siły elektromotorycznej w punkcie gwiazdowym Ezero (rys. 3.) uzyskuje maksimum lub minimum. Wraz z rozwojem techniki mikroprocesorowej poszukiwane są różne sposoby rozwiązywania tego problemu.

#### 4. SPOSOBY STEROWANIA SILNIKIEM BLDC

Do zasilania bezszczotkowych silników prądu stałego stosowane są przekształtniki częstotliwości o strukturze falownika prądu lub napięcia. Od samego początku istnienia tego rodzaju maszyn szukano sposobu śledzenia położenia wału maszyny, gdyż właśnie na podstawie tej informacji następuje prawidłowe załączenie kolejnych faz uzwojeń wirnika. W literaturze można spotkać trzy różne metody rozwiązywania tego problemu:

- pomiar prędkości lub położenia wirnika za pomocą czujnika,
- wyliczenie prędkości przez układ sterujący wykorzystujący do tego model matematyczny danej maszyny,
- wyznaczanie położenia wirnika poprzez pomiar odpowiednich wielkości (np. siły elektromotorycznej).

Dwie ostatnie metody wymagają użycia odpowiednich wydajnych układów mikroprocesorowych. Spowodowane jest to koniecznością sterowania załączaniem kluczy falownika oraz wyliczenia niezbędnych informacji w odpowiednio krótkim czasie.

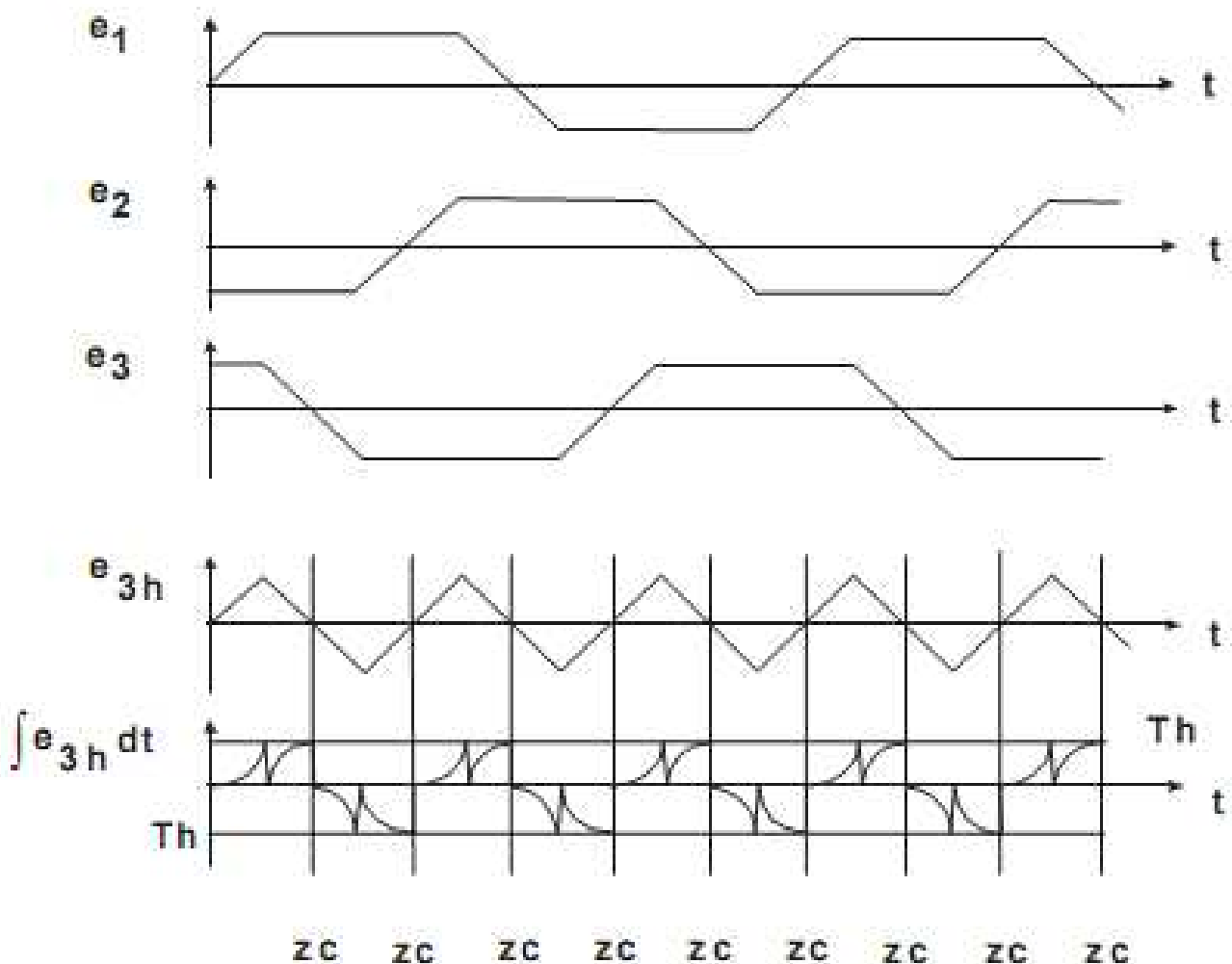
##### 4.1. Sterowanie na podstawie siły elektromotorycznej w wyłączanej fazie

Przebieg siły elektromotorycznej silnika bezszczotkowego prądu stałego w punkcie gwiazdowym pozwala w prosty sposób określić moment, w którym należy załączyć kolejne fazy uzwojeń stojana. Moment ten następuje w chwili, gdy wartość siły elektromotorycznej osiąga minimum lub maksimum. Niestety rzadko spotyka się silniki z wyprowadzonym

punktem gwiazdowym w celu pomiaru sem. W sytuacji, gdy taki przewód jest dostępny, żądane przebiegi nie są tak gładkie, w wyniku czego trudno jest jednoznacznie określić moment przełączenia faz.

Jednym ze sposobów poradzenia sobie z powyższym problemem jest pomiar i odpowiednia obróbka przebiegu siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie. Metoda ta oparta została na właściwościach trzeciej harmonicznej siły elektromotorycznej w otwartej fazie, której przebieg pokrywa się dokładnie z przebiegiem siły elektromotorycznej w punkcie gwiazdowym maszyny. Sposób wyznaczania momentu przełączania faz przedstawia rys. 4. Moment przełączenia faz następuje w chwili, gdy scałkowana wartość siły elektromotorycznej w otwartej fazie osiągnie określony poziom zaznaczony na rysunku jako  $Th$ . Poziom ten jest osiągany, co  $30^\circ$  elektrycznych i jest zależny od innych parametrów. Ponieważ próg  $Th$  jest funkcją stałej siły elektromotorycznej, jego wartość może zmieniać się pod wpływem czynników takich jak na przykład temperatura. Aby zapobiec takiej zależności można zastosować zmienny poziom progu przełączania  $Th$ , postępując wg następujących zasad:

- siła elektromotoryczna zostaje scałkowana od momentu przejścia przez zero ( $zc$ ), do chwili kiedy wartość całki „komutacji” osiągnie określony próg ( $Th$ )
- po przełączeniu wykonane zostaje dalsze całkowanie siły elektromotorycznej do momentu osiągnięcia przez nią wartości 0. Następnie wynik tego całkowania zostaje porównany z wcześniejszym i jeżeli ich wartości nie pokryją się, próg  $Th$  jest powoli nastawiany, do momentu, gdy wartości całek są równe.



Rys. 4. Sterowanie z wykorzystaniem trzeciej harmonicznej

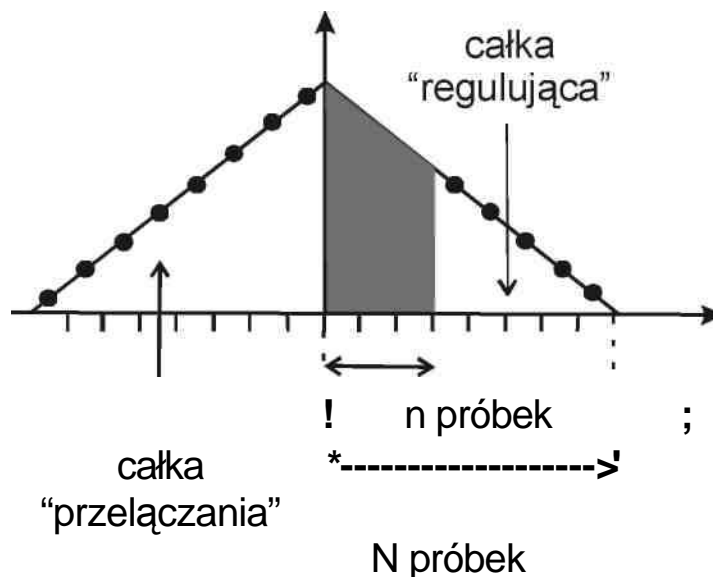
Minusem takiego rozwiązania jest fakt, iż przy komutacji z prądami w trzech fazach, nie można zmierzyć części całki „dostrajającej”. Sytuacja ta została przedstawiana na rys 5.

Na przebiegu obejmującym 60° elektrycznych, zostało umieszczonych 16 próbek w odstępach wynoszących 3,75° elektrycznych. Przedstawiona sytuacja odnosi się do maszyny pracującej z prędkością 3000 obr/min i częstotliwości próbkowania rzędu 10 kHz. Opóźnienie komutacji rzędu 0,2-0,3 [MS] jest typowym opóźnieniem, co oznacza, że zaciemniony obszar na rys. 5 nie może zostać zmierzony. Dlatego też cały zakres całki „dostrajającej” zostaje oszacowany na podstawie pomierzonej całki (niezamalowany obszar całki „dostrajającej”) oraz znanych próbek  $n$  i  $N$ . Całkując dany trójkąt otrzymano równanie:

$$A_{reg} = A_{reg}^* \left[ 1 + \frac{n}{N-n} \left( 2 + \frac{n}{N-n} \right) \right]$$

gdzie:

- $A_{reg}$  - oszacowana wartość całki „regulującej”,
- $A_{reg}^*$  - zmierzona wartość całki „regulującej”,
- $n$  - liczba próbek w obszarze opóźnionej komutacji,
- $N$  - liczba próbek w zakresie 30° elektrycznych.



Rys. 5. Całkowanie przebiegu siły elektromotorycznej

Wymieniony wyżej sposób wymaga ciągłego pomiaru trzech różnych wielkości. Jest to uciążliwe przede wszystkim przy pomiarze prądu, który wymaga zastosowania drogich przetworników LEM i przetworników analogowo-cyfrowych o bardzo wysokiej częstotliwości próbkowania.

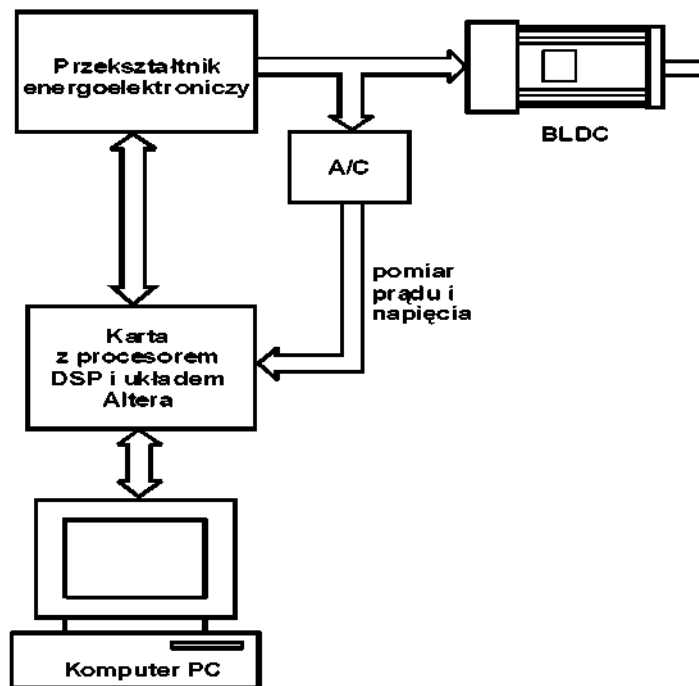
## 5. UKŁAD NAPĘDOWY Z ZASTOSOWANIEM SILNIKA BLDC

### 5.1 Ogólny schemat układu napędowego

Rysunek Rys. 6. przedstawia ogólny schemat blokowy systemu napędowego z wykorzystaniem silnika bezszczotkowego prądu stałego. Podstawowe elementy układu to: silnik BLDC, przekształtnik energoelektroniczny, przetworniki analogowo-cyfrowe, procesor sygnałowy, układ logiki programowalnej oraz komputer klasy PC.



Badany silnik jest zasilany z przekształtnika energoelektronicznego napięciem stałym UDC. W układzie zasilania zastosowano regulację napięcia w obwodzie prądu stałego falownika za pomocą przerywacza. Elementem sterującym pracą przekształtnika jest układ logiki programowalnej firmy Altera. W układzie realizowana jest główna część zadań koniecznych do prawidłowego funkcjonowania układu napędowego. Dane do wyliczenia sygnałów sterujących dostarczane są do układ logiki programowalnej z płyty do pomiaru napięć oraz z przetworników do pomiaru prądu firmy LEM. Wszystkie obliczenia wykonywane są w szybkim procesorze sygnałowym ADSP-21065L. Użytkownik komunikuje się z procesorem sygnałowym przy pomocy komputera klasy PC.

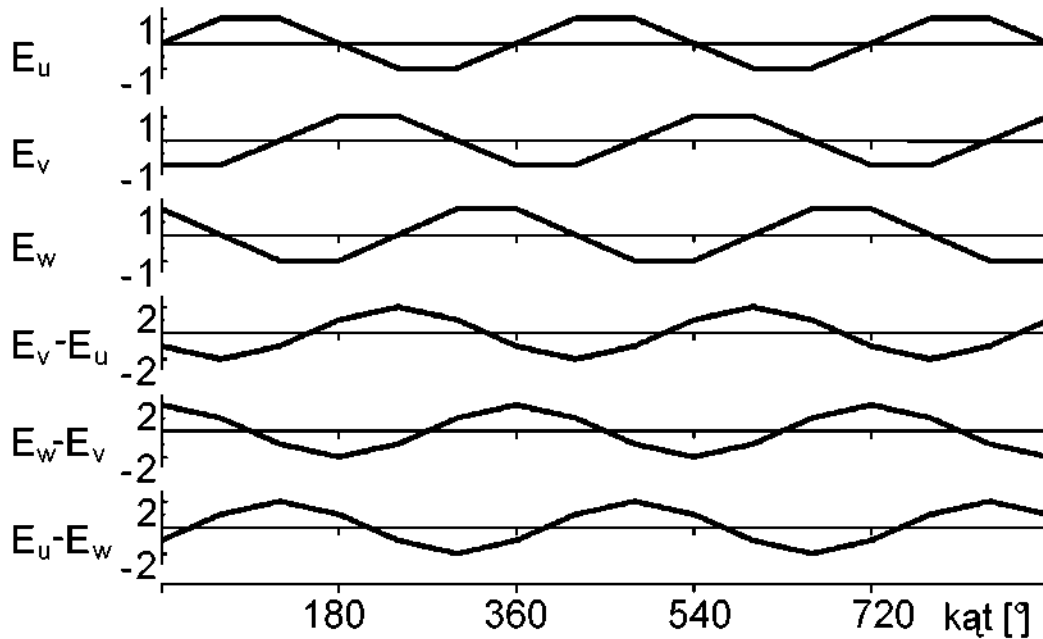


Rys. 6. Schemat blokowy układu napędowego z silnikiem BLDC

Do zasilania drivera przekształtnika oraz przerywacza, a także procesora sygnałowego DSP i układu logiki programowalnej wykorzystano zasilacz impulsowy ZDW 70.

## 5.2 Bezsztotkowy silnik prądu stałego

Silnik z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku, wykorzystany w projekcie, zaprojektowano jako trójfazowy z trzema parami biegunów. Uzwojenia stojana połączone w gwiazdę. Każdy z magnesów biegunów zajmuje  $120^\circ$  elektrycznych. Uzwojenia fazowe wykonano w taki sposób, że przebieg siły elektromotorycznej pojedynczej fazy w funkcji kąta zawiera płaskie odcinki długości  $60^\circ$ . Międzyfazowa siła elektromotoryczna nie zawiera natomiast płaskich odcinków (rys. 7.). Rolę komutatora w napędzie z wykorzystaniem silnika z magnesami trwałymi pełni przekształtnik energoelektroniczny.



Rys. 7. Siły elektromotoryczne w badanym silniku BLDC  
 $E_u, E_v, E_w$  - sem fazowe,  $E_v E_u, E_w - E_v, E_u - E_w$   
 - sem międzyfazowe.

### 5.3 Model matematyczny silnika

Poniższy model opracowano z wykorzystaniem potencjału punktu połączenia faz silnika BLDC. Równania różniczkowe dla trzech faz silnika z wykorzystaniem potencjału zera gwiazdy mogą być przedstawione w następujący sposób [1]:

$$\frac{di_{su}}{d\tau} = \frac{1}{L_s} \left( -R_s i_{su} - \frac{d\psi_{fu}(\alpha)}{d\alpha} \omega_r + u_U - u_0 \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{di_{sv}}{d\tau} = \frac{1}{L_s} \left( -R_s i_{sv} - \frac{d\psi_{fv}(\alpha)}{d\alpha} \omega_r + u_V - u_0 \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{di_{sw}}{d\tau} = \frac{1}{L_s} \left( -R_s i_{sw} - \frac{d\psi_{fw}(\alpha)}{d\alpha} \omega_r + u_W - u_0 \right) \quad (5.3)$$

gdzie:

- $i_{su}, i_{sv}, i_{sw}$  - prądy fazowe silnika,
- $\psi_{fu}(\alpha), \psi_{fv}(\alpha), \psi_{fw}(\alpha)$  - strumienie wirnika sprzężone z uzwojeniami faz stojana,
- $\alpha$  - kąt położenia wirnika,
- $u_U, u_V, u_W$  - potencjały zacisków faz wyjściowych falownika względem jennego bieguna kondensatora w obwodzie zasilającym,
- $u_0$  - potencjałem zera gwiazdy względem ujemnego bieguna kondensatora,
- $R_s, L_s$  - indukcyjność i rezystancja fazy stojana,
- $\tau$  - czas względny.

Wszystkie zmienne oraz parametry silnika występujące wyrażono w wielkościach względnych.

W wyniku dodania równań prędkości obrotowej oraz kąta położenia wirnika uzyskuje się kompletny model matematyczny silnika:

$$\frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{1}{J} (\psi_{sd} i_{sq} - m_0) \quad (5.4)$$

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \omega_r \quad (5.5)$$

gdzie:

$J$  - moment bezwładności,

$m_0$  - jest momentem obciążenia,

$\psi_{sd}$  - składowa wektora strumienia w osi d,

$i_{sq}$  - składowa wektora prądu stojana w osi q.

Składowe wektorów prądu i strumienia określone zostały w prostokątnym układzie współrzędnych d,q wirującym synchronicznie z wirnikiem.

Aby uzyskać rozwiązanie równań (5.1) - (5.5) należy określić strumień wirnika skojarzonego z uzwojeniami poszczególnych faz w funkcji kąta  $\alpha$  oraz ich pochodnych. Potencjały zacisków faz wyjściowych falownika w równaniach (5.1) - (5.3) określone są przez algorytm sterowania silnikiem, natomiast potencjał zera gwiazdy zostaje określony jako funkcja pozostałych zmiennych. Wyprowadzenie tej funkcji opiera się na zależności występującej dla trójfazowego zasilania bez przewodu zerowego:

$$i_u + i_v + i_w = 0 \quad (5.6)$$

Zachodzi zależność:

$$\frac{di_u}{dt} + \frac{di_v}{dt} + \frac{di_w}{dt} = 0 \quad (5.7)$$

Biorąc pod uwagę powyższą zależność (5.7) oraz równania (5.1) - (5.3) potencjał zera gwiazdy otrzymamy po rozwiązaniu wyrażenia:

$$u_0 = \frac{1}{3} \left[ -\omega_r \left( \frac{d\psi_{fu}(\alpha)}{d\alpha} + \frac{d\psi_{fv}(\alpha)}{d\alpha} + \frac{d\psi_{fw}(\alpha)}{d\alpha} \right) + u_U + u_V + u_W \right] \quad (5.8)$$

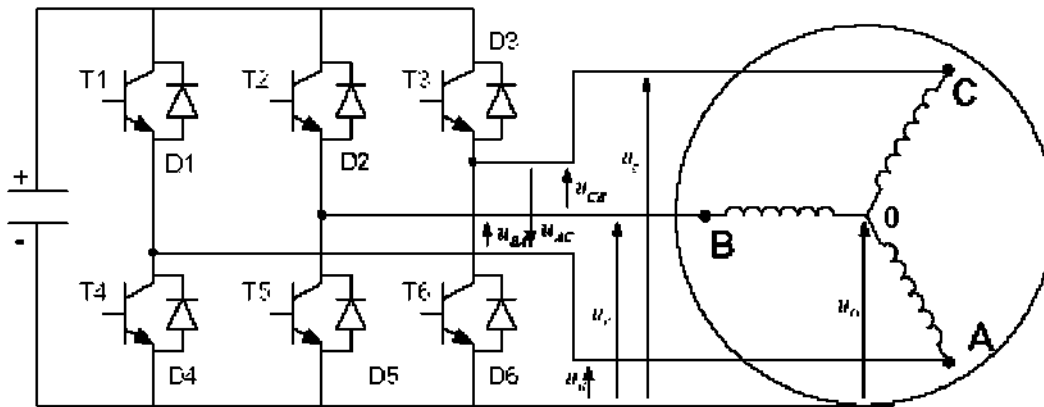
$$\frac{d\psi_{fu}(\alpha)}{d\alpha} + \frac{d\psi_{fv}(\alpha)}{d\alpha} + \frac{d\psi_{fw}(\alpha)}{d\alpha} = 0 \quad (5.9)$$

Powyższa zależność upraszcza wyznaczanie potencjału zera gwiazdy i zachodzi dla silnika z siłą elektromotoryczną fazy stałą w zakresie  $60^\circ$ .

## 5.4 Algorytm sterowania

Algorytm sterowania badanego silnika opracowany został na podstawie zależności występujących w silnikach z magnesami trwałymi. Znając przebieg siły elektromotorycznej w punkcie gwiazdowym, przedstawiony na rys. 3., łatwo jest wyznaczyć moment, w którym należy załączyć kolejne fazy uzwojeń stojana. Ponieważ silniki z wyprowadzonym punktem gwiazdowym są rzadkością do sterowania silnikiem BLDC wykorzystano pomiar siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie w celu określenia położenia wirnika.

Bezszcotkowy silnik prądu stałego wykorzystany w projekcie sterowany jest w taki sposób, iż jednocześnie włączane są dwie fazy. Natomiast tranzystory w trzeciej fazie nie zostają załączone i w tym stanie pracy silnika prąd w danej fazie nie płynie. Kolejne sekwencje załączania kluczy falownika zostały przedstawione na rys. 8.



Rys. 8. Schemat przekształtnika zasilającego silnik bezszczotkowy prądu

Sektor	I	II	III	IV	V	VI
Polozenie wału	0°–60°	60°–120°	120°–180°	180°–240°	240°–300°	300°–360°
Tranzystor górny	T2	T1	T1	T3	T3	T2
Tranzystor dolny	T6	T6	T5	T5	T4	T4
Faza A	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON
Faza B	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON
Faza C	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF

Tablica 1. Sekwencja przełączania kluczy gałęzi górnych i dolnych falownika napięcia zasilającego silnik z magnesami trwałymi

Siły elektromotoryczne w wyłączonych fazach określają zależności:

$$E_u = \frac{1}{3}S(2u_U - u_V - u_W)$$

$$E_v = \frac{1}{3}S(2u_V - u_U - u_W)$$

$$E_w = \frac{1}{3}S(2u_W - u_U - u_V)$$

gdzie:

$S$  jest równe 1 jeżeli  $E_i$  rośnie i jest równe  $-1$  jeżeli  $E_i$  maleje,  
 $i$  oznacza fazę.

Sterowanie silnikiem BLDC na podstawie siły elektromotorycznej w wyłączanej fazie zostało dokładnie przedstawione w [1]. Moment przełączenia faz następuje w momencie, gdy napięcie to osiągnie konkretną wartość. Powoduje to jednak dużą zależność poziomu przełączenia od prędkości wirnika oraz pojawienie się odcinków o stałej wartości w stanie przejściowym. Odcinki te, mogą doprowadzić do nie pojawienia się sygnału przełączania i awarii układu.

Przy wykorzystaniu sygnału całki napięcia w wyłączanej fazie można zniwelować przedstawione powyżej wady sterowania. Moment przełączania faz następuje w chwili, gdy scałkowana wartość siły elektromotorycznej w otwartej fazie osiągnie określony poziom  $Th$ . Poziom ten jest osiągany, co  $30^\circ$  elektrycznych. Próg przełączania przy sterowaniu na podstawie całki z napięcia jest rezultatem zależności:

$$C = \int_0^{t_p} E(t) dt$$

Siła elektromotoryczna w fazie określona jest wyrażeniem:

$$E_i = k_E(\alpha)$$

oraz:

$$E(t) = \frac{d\phi}{dt}$$

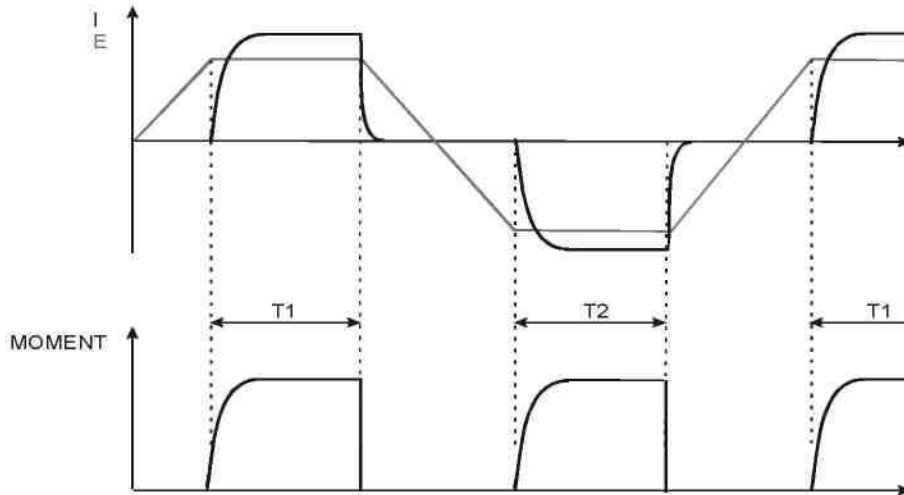
Całkowanie siły elektromotorycznej względem czasu prowadzi do zależności:

$$C = \int_0^{t_p} \frac{\phi(\alpha)}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} dt = \int_0^{\alpha_p} k_E(\alpha) d\alpha$$

i próg przełączenia zależy wyłącznie od kąta przełączenia faz.

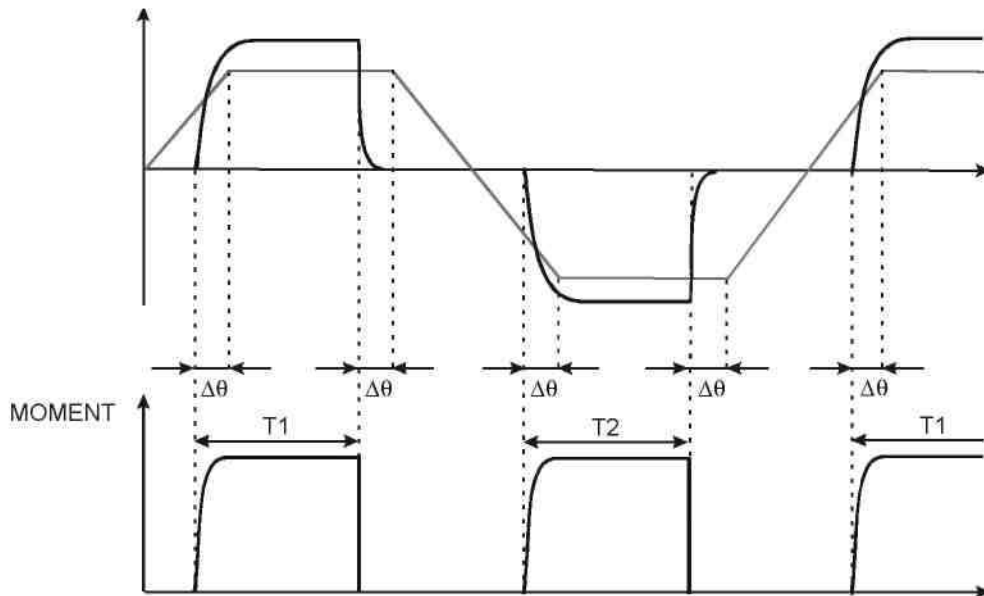
## 5.5. Komutacja tranzystorów

W silniku bezszczotkowym kąt między osiami przepływu uzwojenia twornika i strumienia wzbudzanego zmienia się skokowo, co jest przyczyną dużych pulsacji momentu elektromagnetycznego. Przez odpowiednie sterowanie komutatorem, np. przez zastosowanie komutacji przyspieszonej, można zmniejszyć tętnienia momentu i prędkości, a zwiększyć ich wartość. Indukcyjność faz silnika powoduje, że pomimo wyłączenia tranzystora w przewodzącej fazie prąd płynie w dalszym ciągu w obwodzie zamykanym przez diodę zwrotną. W sytuacji, gdy załączone byłyby tranzystory T1 i T5, oznaczone kolejno od lewej do prawej na schemacie, to załączenie tranzystora T3 i wyłączenie tranzystora T1 spowodowałoby przepływ prądu przez diodę równoległą do tranzystora T4. W wyniku przepływu prądu przez diodę może powstać ujemny moment w wyłączanej fazie.



Rys. 9. Przebieg momentu elektromagnetycznego przy sterowaniu tradycyjnym

Aby zapobiegać takim sytuacjom, w badanym układzie wykorzystano przyspieszenie komutacji tranzystorów IGBT, poprzez wyłączenie odpowiedniego tranzystora. Dzięki zastosowanemu algorytmowi, uzyskano znaczne przyspieszenie komutacji prądu pomiędzy fazami, co w znaczący sposób wpłynęło na przebieg momentu elektromagnetycznego.

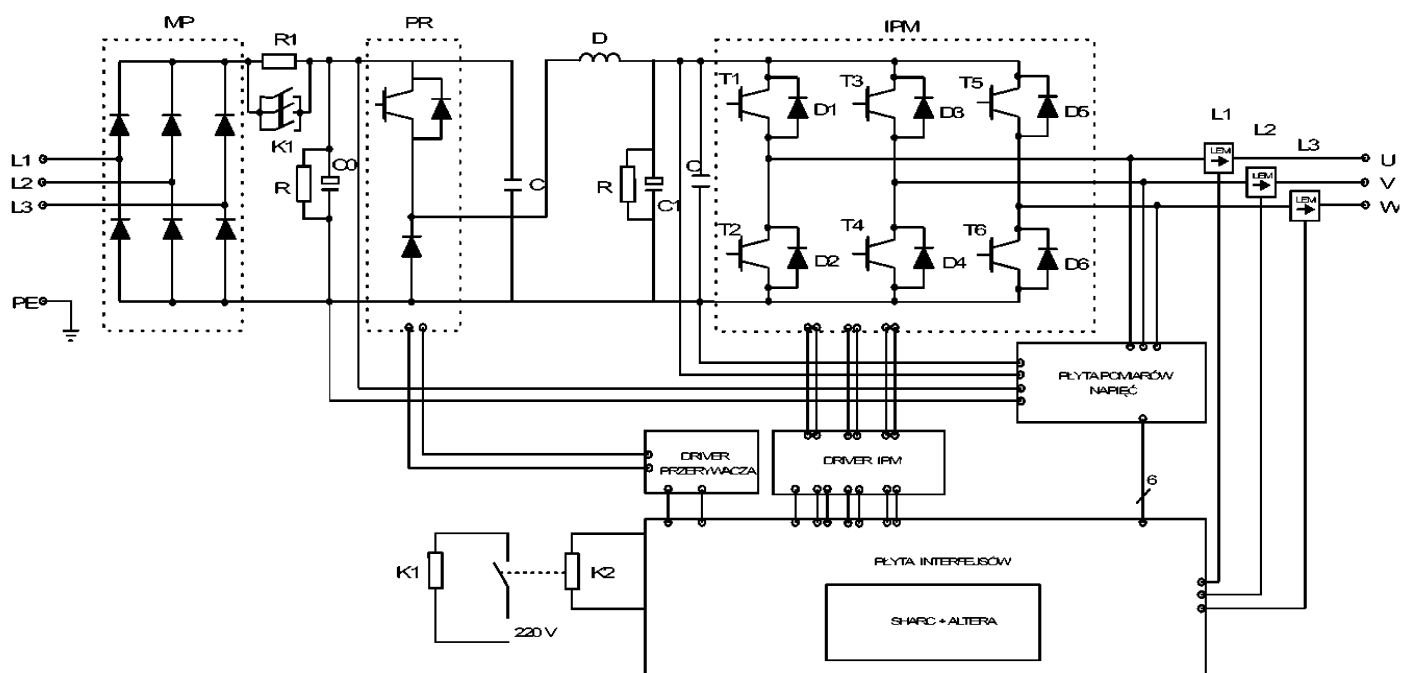


Rys. 10. Przebieg momentu elektromagnetycznego przy zastosowaniu komutacji przyspieszonej

## 5.6 Przekształtnik energoelektroniczny

Przekształtnik energoelektroniczny jest bardzo ważną częścią systemu napędowego z użyciem silnika BLDC. Ogólny schemat układu dla badanego silnika BLDC przedstawia rys. 11. Elementy wykorzystane do budowy przekształtnika:

- MP* - 3-fazowy mostek prostowniczy 36MT120KB,
- PC* - przełącznik czasowy firmy Danfoss typu 037H3145-01
- ST* - stycznik typu CI 4
- PR* - przerywacz typu CM50DY-12H
- C* - kondensatory snubberowe Icel 1,5mF/1200V
- C0, C1* - kondensatory elektrolityczne Epcos 2200 mF/400 V-
- R1* - rezystor 100 W/10 W
- R* - rezystor metalizowany 100 kW/2 W
- D* - dławik
- IPM* - moduł Mitsubishi IPM PM50RSA120
- L1, L2, L3* - przetworniki do pomiaru prądu firmy LEM typu LA 55-P/SP1



Rys. 11. Schemat przekształtnika energoelektronicznego z układem sterowania

## 7. Literatura

- [1] Krzemiński Z.: Bezcujnikowy napęd z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego. Politechnika Gdańska
- [2] Shao J., Nolan D., Hopkins T.: A Novel Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives.
- [3] Gui-Jia Su, McKeever J.W.: Low Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors with Improved Speed Range
- [4] Dixon J.W., Leal I.A.: Current Control Strategy for Brushless DC Motors Based on a Common DC Signal.
- [5] Dixon J., Rodríguez M., Huerta .: Position Estimator And Simplified Current Control Strategy For Brushless-DC Motors, Using DSP Technology.
- [6] Wu B.: Brushless DC Motor Speed Control, Dept. of Electrical & Computing Engineering, Ryerson University Oct. 2001



## 7. Obsługa programu konsola

### Nazwy zmiennych wykorzystywanych w ćwiczeniu:

Iv, Iu, Iw – prądy w uzwojeniach

Ezero- siła elektromotoryczna w wyłączonej fazie

Ezero\_calka- całka siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie

regulator\_his- ograniczenie prądowe regulatora histerezy (symetrycznego)

k\_Udf- stosunek między napięciem a częstotliwością (przy sterowaniu U do f)

ki – wzmacnienie części całkującej regulatora napięcia

kp – wzmacnienie części proporcjonalnej regulatora napięcia

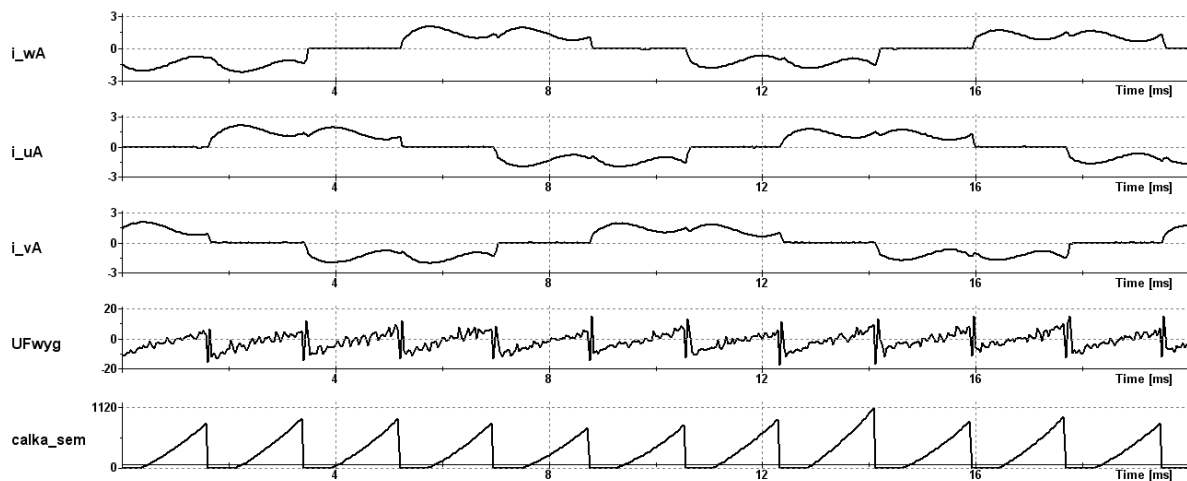
speed\_F – prędkość obrotowa silnika

moc\_F – moc chwilowa silnika

uuv, uvw, uwu- napięcia międzyfazowe wyskalowane w voltach

u\_uV, u\_vV, u\_wV – napięcia fazowe wyskalowane w voltach

Mem – moment elektromagnetyczny



Rys. 14. Przykładowe przebiegi prądów fazowych, siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie, oraz całki siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie.

## 8. Przebieg ćwiczenia

1. Sprawdzić połączenia układu zasilania układu napędowego.
2. Zapoznać z działaniem i obsługą programu konsola. Wgrać do procesora program *bldc.ldr*.
3. Sterowanie skalarne.
  - 3.1. W zakładce **Control** przełączyć na tryb sterowania **Skalarne**.
  - 3.2. Dobrać proporcje k\_Udf aby możliwe było uzyskanie prędkości 0.2 (wg zadajnika).
  - 3.3. Dla prędkości 0.2 (wg zadajnika). dokonać rejestracji prądów w uzwojeniach, siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie, całki siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie.
  - 3.4. Zbadać wpływ prądu ograniczenia regulatora histerezy na przebieg prądów w uzwojeniach (zakres 4-10). Zarejestrować przebiegi prądów przy widocznym wpływie ograniczenia.
  - 3.5. Przy k\_Udf = 0.35 dobrać wzmacnienia ki oraz kp tak aby możliwe było uzyskanie prędkości 0.25 (wg zadajnika). Dokonać rejestracji prądów w uzwojeniach, siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie, całki siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie.
  - 3.6. Wykonać charakterystykę mechaniczną. Odczytując zmienne: moment elektromagnetyczny, prędkość. W sprawozdaniu skomentować kształt charakterystyki.
4. Sterowne **bezcujnikowe**.

- 4.1. W zakładce **Control** przełączyć na tryb sterowania **bezcujnikowe**.
- 4.2. Dla kp i ki dobranego w punkcie 3.5 zarejestrować napięcia międzyfazowe.
- 4.3. Dla kp i ki dobranego w punkcie 3.5 zarejestrować: napięcia fazowe wyskalowane w voltach.
- 4.4. Dla kp i ki dobranego w punkcie 3.5 dokonać rejestracji prądów w uzwojeniach, siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie, całki siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie.
- 4.5. Zbadać wpływ prądu ograniczenia regulatora histerezy na przebieg prądów w uzwojeniach (zakres 4-10). Zarejestrować przebiegi prądów przy widocznym wpływie ograniczenia.
- 4.6. Dla układu z obciążeniem przy prędkości 0,2 (wg zadajnika). oraz 0,60(wg zadajnika). zarejestrować: prądy w uzwojeniach, siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie, całki siły elektromotorycznej w wyłączonej fazie
- 4.7. Wykonać charakterystykę mechaniczną. Odczytując zmienne: moment elektromagnetyczny, prędkość. W sprawozdaniu skomentować kształt charakterystyki.