

ZAJKOWSKI Konrad<sup>1</sup>  
DUER Stanisław<sup>2</sup>

### STEROWANIE BEZSZCZOTKOWYM SILNIKIEM PRĄDU STAŁEGO

*W artykule omówiono zasadę działania bezszczotkowych silników (BLDC). Omówiono sposoby sterowania i detekcji chwili komutacji. Omówiono kilka metod stosowanych do pomiaru kąta położenia wirnika. Przedstawiono sposoby sterowania kluczami elektronicznymi metodami unipolarnymi i bipolarnymi.*

### CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR

*In the article has been presented principle of brushless motors (BLDC). Discusses ways to control and designate time of commutation. Discusses a few methods used to measure the angle of the rotor position. Presents ways to control transistors in bipolar and unipolar methods.*

#### 1. WSTĘP

Wśród silników synchronicznych prądu stałego wyróżnić można silniki bezkomutatorowe (BLDC). Silnik ten nie posiada komutatora mechanicznego, a wirujące pole magnetyczne uzyskuje się dzięki sterownikowi elektronicznemu. Kolejność zasilania faz silnika jest zależna od sygnałów sterujących, które generowane są w oparciu o sygnał położenia wirnika. Dzięki usunięciu komutatora mechanicznego uzyskano wiele zalet tego silnika. Brak szczotek na komutatorze to brak wyładowań łukowych, zmniejszenie zakłóceń radioelektrycznych i zwiększenie bezawaryjności. Pozwala to na pracę silnika w środowiskach agresywnych i wybuchowych. W silniku BLDC nie występuje zjawisko utraty synchronizmu w przypadku przeciążenia silnika, co jest wadą innych maszyn synchronicznych. Wynika to ze sposobu generowania wirującego pola magnetycznego. Pole to jest kształtowane z pomiaru kąta położenia wirnika względem stojana a nie jak w pozostałych maszynach synchronicznych w dziedzinie czasu.

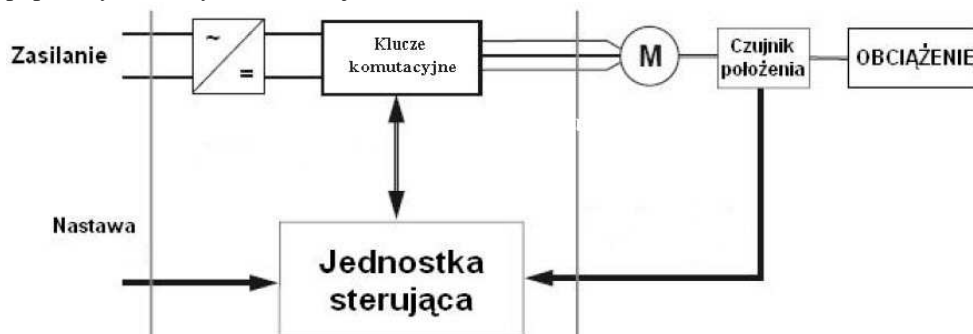
<sup>1</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15-17.  
Tel: +48 3478-426, E-mail: konrad.zajkowski@tu.koszalin.pl

<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15-17.  
Tel: +48 3478-262, E-mail: stanislaw.duer@tu.koszalin.pl

## 2. UKŁAD STEROWANIA

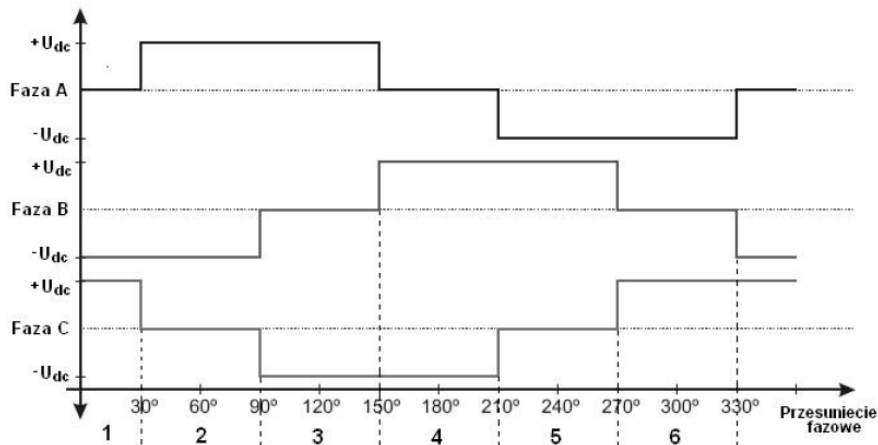
Wśród wielu metod sterowania kluczami w komutatorze elektronicznym silnika BLDC trudno o jednolite uporządkowanie algorytmów. Literatura krajowa najczęściej stosuje podział sterowania silników bezszczotkowych na sterowanie trapezowe (nazywane potocznie klasycznym bądź blokowym gdzie rozkład pola magnetycznego jest trapezoidalny) i sterowanie sinusoidalne [1, 3].

Poniżej przedstawiono schemat blokowy układu sterowania silnikami BLDC. Jest on poprawny dla wszystkich rodzajów silników BLDC.



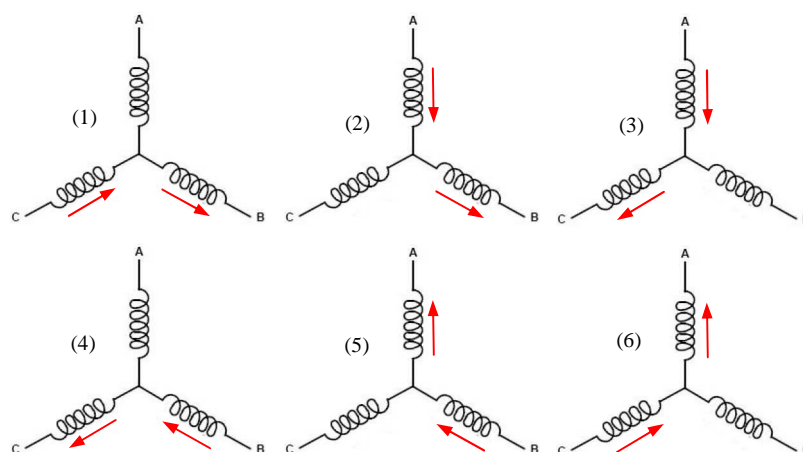
Rys.1. Schemat blokowy układu sterowania silnikiem BLDC

Do utrzymania synchronizmu jednostka sterująca wykorzystuje sygnały z czujników położenia wirnika. Przebiegi napięć sterujących zależą od konstrukcji silnika. Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi dla trójfazowego silnika z uzwojeniami połączonymi w gwiazdę.



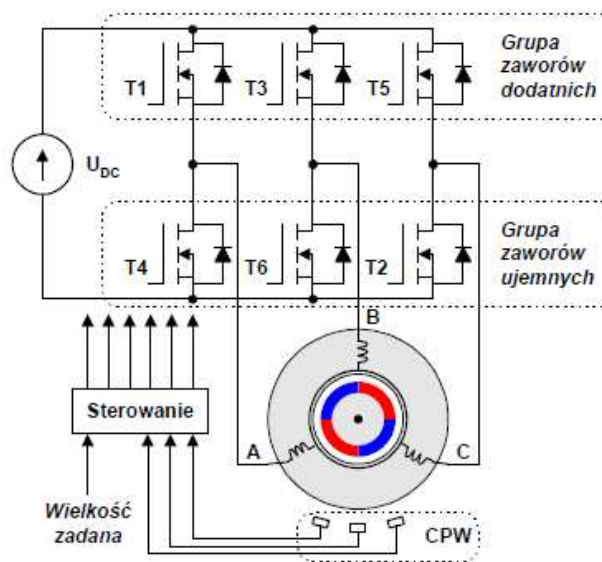
Rys.2. Przebiegi trzech faz silnika BLDC z uzwojeniami połączonymi w gwiazdę

Cechą charakterystyczną silników BLDC z uzwojeniami połączonymi w gwiazdę jest nieobciążanie jednej fazy silnika we wszystkich położeniach wirnika. Jeden cykl pracy składa się z 6 faz pracy.



Rys.3. Kolejne fazy pracy silnika BLDC

Zmiana kierunku przepływu prądu realizowana jest przez odpowiednią aktywację kluczy w komutatorze.



Rys.4. Schemat sterowania napędu silnika BLDC

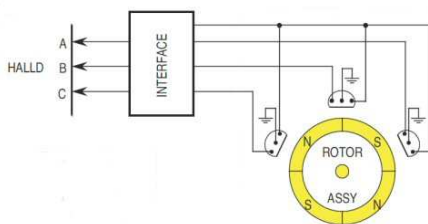
Wyróżnić można trzy sposoby określania pozycji wirnika względem biegunów magnetycznych stojana:

- pomiar zmian pola przez 3 czujniki Hall'a,
- impulsatory optyczne lub magnetyczne z licznikiem,
- pomiar SEM indukowanej w uzwojeniach stojana,
- wyliczenie prędkości przez układ sterujący wykorzystujący do tego model matematyczny danej maszyny.

Wymienione 4 sposoby dostarczają sygnały sprzężenia zwrotnego o różnym charakterze, dlatego każda metoda wymaga zmodyfikowanej struktury komutatora i algorytmów sterowania. Pierwsze dwie metody są metodami wymagającymi dodatkowych czujników. Pozostałe dwie nazywane są bezczujnikowymi i wymagają użycia odpowiednich wydajnych układów mikroprocesorowych, które będą w stanie wyliczyć wszystkie niezbędne informacje w odpowiednio krótkim czasie i dodatkowo sterować załączaniem kluczy falownika.

### 2.1 Wykorzystanie czujników Hall'a

Zmiana wektora pola musi nastąpić w ściśle określonym momencie. Trzy czujniki Hall'a dostarczają trzech sygnałów, reprezentujących sześć stanów komutacji. Każdej kombinacji sygnałów z czujnika Hall'a odpowiada jeden wektor natężenia pola stojana.



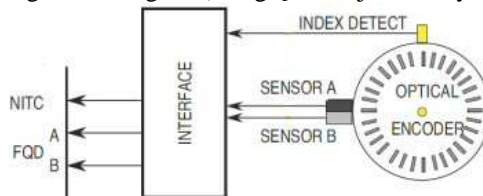
Rys.5. Struktura układu z hallotronami

Sygnały A, B i C z czujników Hall'a przyjmują wartości logiczne 0, 1 i zależą nad którym biegunem pola wirnika znajduje się czujnik. Wirujące pole magnetyczne tworzone w sześciu kolejnych krokach komutacji nie pozwala utrzymać stałego kąta między wektorami pola stojana i wirnika (od 60 do 120 stopni).

### 2.2 Wykorzystanie zewnętrznych impulsatorów

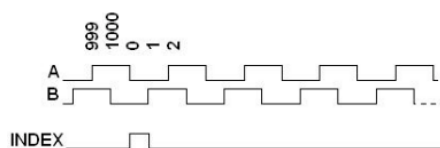
Zewnętrzne układy pomiaru kąta oparte na liczniku impulsów optycznych bądź magnetycznych wymagają specjalistycznych rozwiązań konstrukcyjnych. Często spotykanym rozwiązaniem jest zastosowanie kodera kwadraturowego wraz z układem czujników Hall'a w jednej scalonej obudowie (np. seria AS5040). Wewnątrz struktury układu znajduje się procesor połączony z matrycą czujników pola magnetycznego. Dzięki

specjalnemu algorytmowi procesor potrafi określić położenie linii sił pola magnetycznego (biegnących pomiędzy biegunami magnesu) względem tej struktury.



Rys.6. Struktura układu z optycznym enkoderem

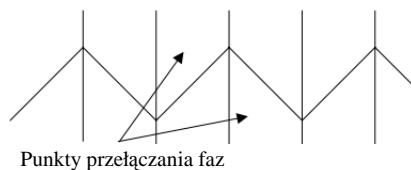
W przeciwieństwie do czujników Hall'a, sygnały z kodera kwadraturowego nie określają bezpośrednio pozycji wirnika i momentu komutacji. Na wyjściach A i B kodera wytwarzane są dwa przebiegi prostokątne przesunięte w fazie o 90 stopni. Liczba kolejno zliczonych zboczy sygnałów pozwala dokładnie określić przemieszczenie kątowe wirnika. Dokładność pomiaru zależy od rozdzielczości kodera. Pomiar dokonywany jest względem ustalonego punktu odniesienia, którym może być przykładowo impuls indeksujący z trzeciego wyjścia kodera, pojawiający się raz na pełen obrót.



Rys.7. Przykładowy przebieg sygnału na wyjściu kodera kwadraturowego

### 2.3 Pomiar wstecznej SEM (back EMF) –bezcujnikowy

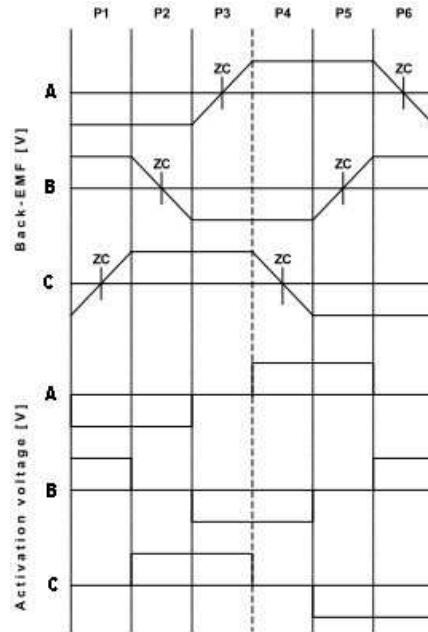
Obserwacja siły elektromotorycznej silnika BLCD w centralnym punkcie gwiazdowym pozwala określić moment, w którym załącza się kolejne fazy. Moment ten odpowiada sytuacji, gdy wartość sem osiąga minimum bądź maksimum.



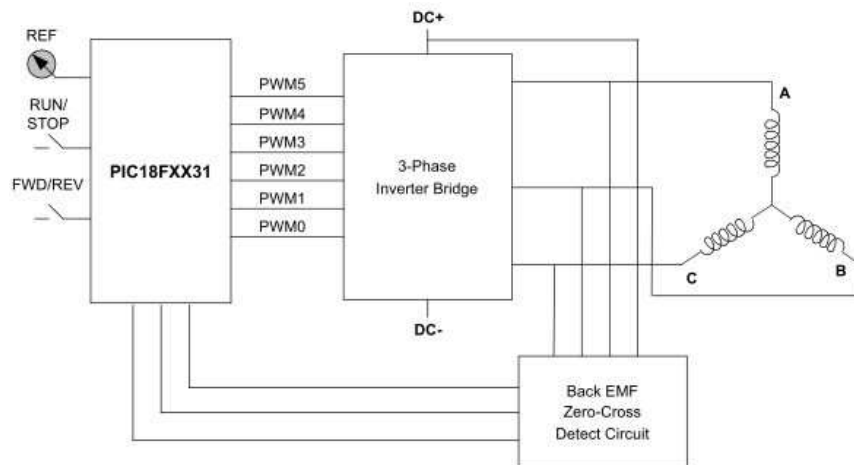
Rys.8. Przebieg siły elektromotorycznej w punkcie gwiazdowym

Niestety rzadko spotyka się silniki z wyprowadzonym punktem gwiazdowym, a ponadto żądane przebiegi nie są tak jednoznaczne (trudność z precyzyjnym określeniem momentu przełączenia fazy). Jednym ze sposobów ułatwiających pomiar jest obróbka przebiegu sem 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. Moment przełączenia faz następuje w chwili, gdy scałkowana wartość siły elektromotorycznej w otwartej fazie osiągnie określony poziom.



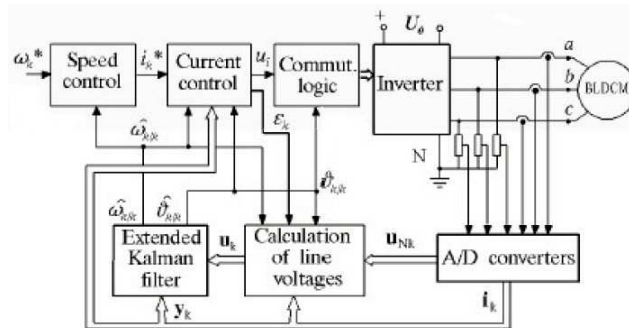
Rys.9. Przebiegi wstecznych SEM oraz prądu trzech faz zasilających



Rys.10. Przykładowy układ sterowania silnikiem BLDC

## 2.4 Wylczenie prędkości przez układ sterujący –bezczyJNIKOWY

Metoda ta ma największe wymagania od układu logicznego, gdyż do sterowania w tej metodzie wykorzystuje się ich model matematycznych. Sposób ten wymaga również precyzyjnego opisu matematycznego zjawisk zachodzących w maszynie i stałych fizycznych charakteryzujących silnik (np. rezystancja i indukcyjność każdej fazy, strumień magnetyczny magnesów trwałych, moment bezwładności). Układ mikroprocesorowy w czasie rzeczywistym na podstawie mierzonych napięć i prądów zasilających musi wyznaczyć położenie wirnika i obliczyć pozostałe zmienne do sterowania silnikiem. Ostatnio sterowanie za pomocą modelu matematycznego cieszy się coraz większym zainteresowaniem za sprawą rozwoju techniki mikroprocesorowej.



Rys.11. Schemat blokowy bezczyJNIKOWEGO układu pomiaru kąta i prędkości

Powyższy układ składa się z części:

- wysoko-prądowej (źródło DC, falownik, silnik),
- układu kontrolnego (regulator prądu i prędkości, układ logiczny sterujący załączaniem kluczy),
- pomiarowej (układy pomiaru napięcia i prądu w tym przetworniki analogowo-cyfrowe)
- filtr Kalmana i blok obliczający napięcia średnie w czasie rzeczywistym.

Filtr Kalmana jest podstawą działania tego układu. Filtr ten na podstawie pomierzonych wielkości  $u$  oraz  $i$  wyznacza chwilowe położenie i prędkość wirnika. Wielkości te są przekazywane do układu sterującego i układu obliczającego wymagane napięcia fazowe. Prędkość kątowa jest wielkością zadaną i jest przekazywana do regulatora prędkości.

## 3. PODZIAŁ METOD STEROWANIA

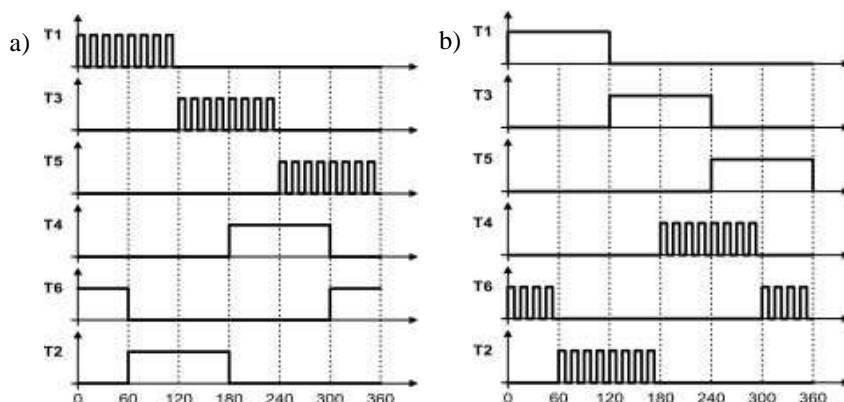
W silniku z komutacją elektroniczną kąt między osiami uzwojeń twornika i strumienia wzbudzanego zmienia się skokowo, co powoduje duże pulsacje momentu elektromagnetycznego. Ponadto indukcyjności faz silnika powodują zachowanie prawa ciągłości prądu. Pomimo wyłączenia tranzystora, prąd płynie w dalszym ciągu w obwodzie zamykanym przez diodę zabezpieczającą. Wymaga się zatem aby strumień magnetyczny twornika w silniku BLDC przyjmował strategię trapezoidalną. Uzyskuje się to poprzez

sterowanie PWM odpowiednimi kluczami komutatora. Wyróżnić tu można dwa sposoby sterowania. Metody prądowe (**symbol C**) bazują na zmianie prądów fazowych silnika. Metody napięciowe (**symbol V**) różnią się od prądowych tym, że wielkością regulowaną jest napięcie zasilające silnik.

Kolejny podział metod sterowania można przeprowadzić ze względu na kąt elektryczny pełnienia funkcji regulacyjnej przez poszczególne tranzystory. **Symbol 120** oznacza, że kąt pełnienia funkcji regulacyjnej przez jeden z tranzystorów wynosi cały okres przewodzenia, czyli  $120^\circ$  elektrycznych. W drugim przypadku każdy tranzystor pełni funkcję regulacyjną przez okres  $60^\circ$  elektrycznych – przez okres pozostałych  $60^\circ$  funkcję regulacyjną przejmuje zawór z grupy przeciwnej (**symbol 60**).

Ze względu na to, która grupa tranzystorów realizuje funkcję sterowania PWM strategii sterowania można podzielić na trzy przypadki. Gdy funkcję sterowania pełni tylko tranzystory grupy dodatniej (przez pierwsze  $60^\circ$  okresu przewodzenia), wówczas metodę tą oznacza się **symbolem Q+**. Jeżeli funkcję sterowania pełni tranzystory grupy ujemnej (przez ostatnie  $60^\circ$  okresu przewodzenia), wówczas metodę oznacza się **symbolem Q-**. Gdy funkcję sterowania pełni wszystkie aktywne tranzystory, metodę sterowania nazywa się **bipolarną** [2] a w pozostałych przypadkach **unipolarną**.

Przykładowo symbol C120Q+ oznacza, że funkcję regulacyjną pełni tylko tranzystory grupy dodatniej. W tym czasie tranzystory grupy ujemnej pełni rolę komutatorową.



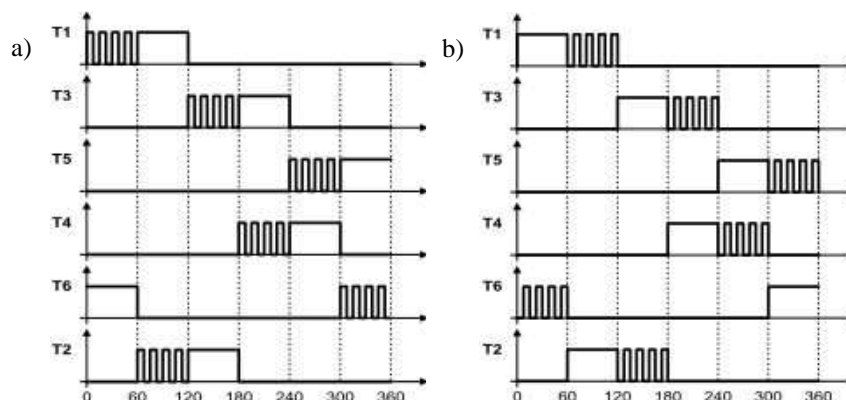
Rys.12. Aktywność kluczy a) C120Q+, oraz b) C120Q-

Analogicznie przy sterowaniu C120Q- funkcję regulacyjną pełni jedynie tranzystory grupy ujemnej. Tranzystory grupy dodatniej spełniają rolę komutatorową.

W metodach C120Q+ i C120Q- funkcję sterowania PWM pełni trzy tranzystory co upraszcza układ elektroniczny. Takie sterowanie niesie za sobą nierównomierne obciążenie tranzystorów i różne częstotliwości przełączeń.

W metodzie C60Q+ tranzystory przez pierwsze  $60^\circ$  okresu aktywacji pełni funkcję sterowania PWM, a przez okres kolejnych  $60^\circ$  spełniają jedynie rolę komutatorową. Analogicznie w metodzie C60Q- tranzystory przez pierwsze  $60^\circ$  okresu aktywacji pełni jedynie rolę komutatorową, a przez okres kolejnych  $60^\circ$  pełni funkcję sterowania.

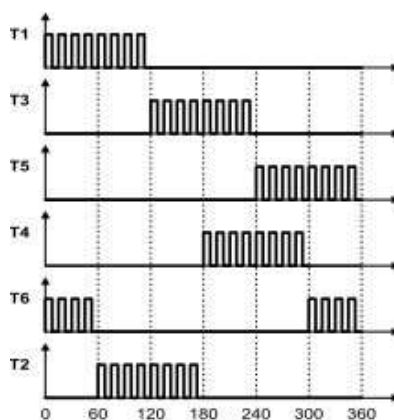




Rys.13. Aktywność kluczy a) C60Q+, oraz b) C60Q-

Zaletą metod C60Q+ i C60Q- jest równomierne wykorzystanie wszystkich tranzystorów. Wadą jest większa złożoność układu elektronicznego i nierównomierne częstotliwości przełączeń.

Przy sterowaniu bipolarnym przewodzące tranzystory obu grup pełnią równocześnie funkcje sterowniczą PWM oraz komutacyjną. Zaletą tego sterowania jest równomierne obciążenie wszystkich tranzystorów i jednakowe częstotliwości przełączeń. Wadą natomiast są wyższe straty.



Rys.14. Aktywność kluczy w układzie bipolarnym

Aby zapewnić takie same warunki pracy silnika przy zastosowaniu sterowania bipolarnego jak przy sterowaniu unipolarnym, należy zwiększyć częstotliwość przełączeń tranzystorów.

#### 4. WNIOSKI

Silniki bezszczotkowe prądu stałego dotychczas znane są przede wszystkim jako silniki wykonawcze małej mocy. Wraz z rozwojem elektroniki silniki BLDC o mocy przekraczającej 1kW, znajdują coraz szersze zastosowanie w różnego typach napędów pojazdów elektrycznych. Największą sprawność tych silników zapewniają magnesy trwałe z domieszką metali ziem rzadkich. Zalety eksploatacyjne tych silników dotychczas zauważali modelarze (duża sprawność, małe gabaryty) oraz producenci sprzętu AGD (komputery, ksera, drukarki, itp.). Większe zainteresowanie sposobami sterowania tego typu silnikami w świetle taniejących sterowników i łatwiejszego dostępu do aplikacji prowadzi do zwiększenia obszaru możliwych zastosowań. Przedstawione metody sterowania są próbą ujednoczenia algorytmów implementowanych w silnikach bezszczotkowych prądu stałego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dencer A., Glinka T., Jakubiec M., Polak A.: *Bezczotkowy silnik prądu stałego – sposoby sterowania komutatorem elektronicznym*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 65/2003, BOBRME Komel Katowice 2003.
- [2] Domoracki A., Krykowski K.: *Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 72/2005. Politechnika Śląska, Gliwice 2005
- [3] Dudzikowski I., Pawlaczyk L.: *Maszyny prądu stałego o magnesach trwałych i ich sterowanie – stan aktualny i perspektywy rozwoju*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 176, Gliwice 2001.
- [4] Przepiórkowski J.: *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*. Elektronika Praktyczna 1/2004
- [5] Strona internetowa <http://www.ely.pg.gda.pl/kane/Dydaktyka/BLDC-instrukcja.pdf>