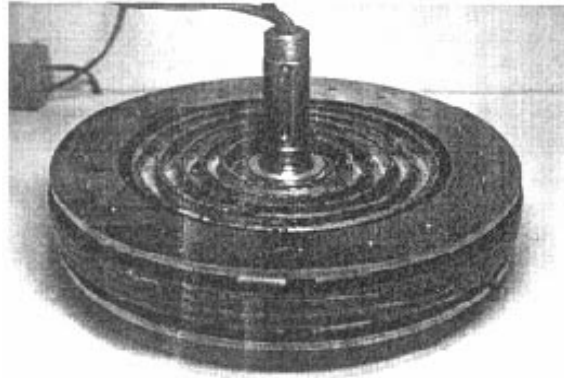


ĆWICZENIE

Badanie układu napędowego z silnikiem bezszczotkowym z magnesami trwałymi

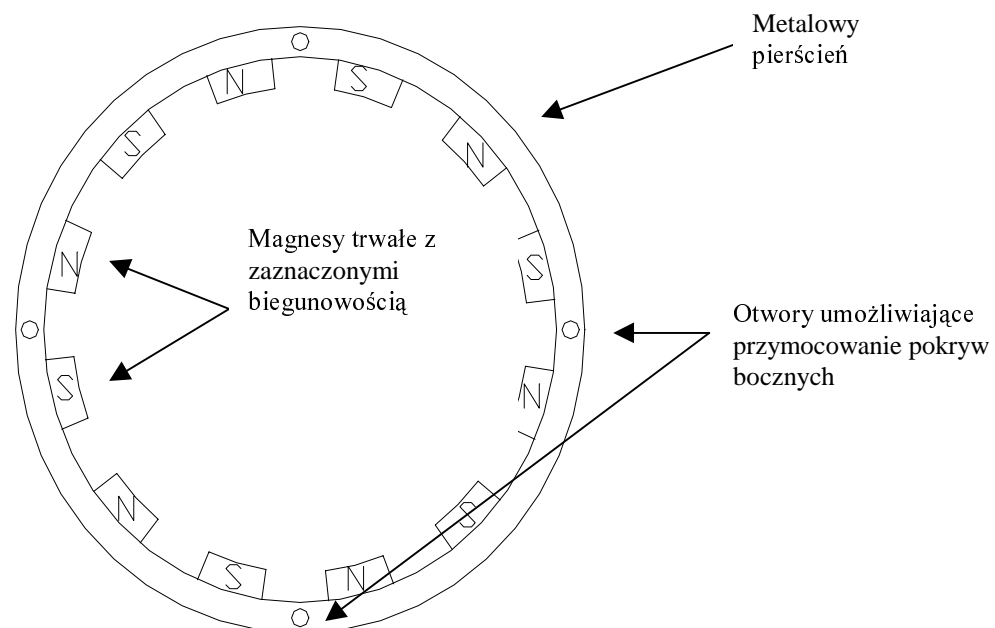
mięśni w pojazdach kołowych o odpowiednio dużych piastach w kołach np. roweru elektrycznego.



Rys. 2. Kompletny silnik z magnesami przyklejonymi do pierścieni wirnika

4. Budowa wirnika

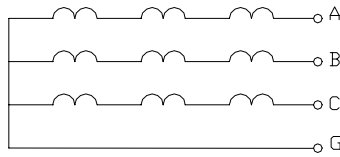
Wirnik silnika wykonany jest w postaci metalowego pierścienia stanowiącego zewnętrzną część silnika. Do pierścienia przykręcone są pokrywy boczne, które zakładane są na łożyska. Dzięki temu wirnik może swobodnie wirować. Do wewnętrznej strony wirnika przyklejonych jest dwanaście magnesów trwałych. Na rysunku 2-3 przedstawiono budowę wirnika.



Rys.3 . Budowa wirnika

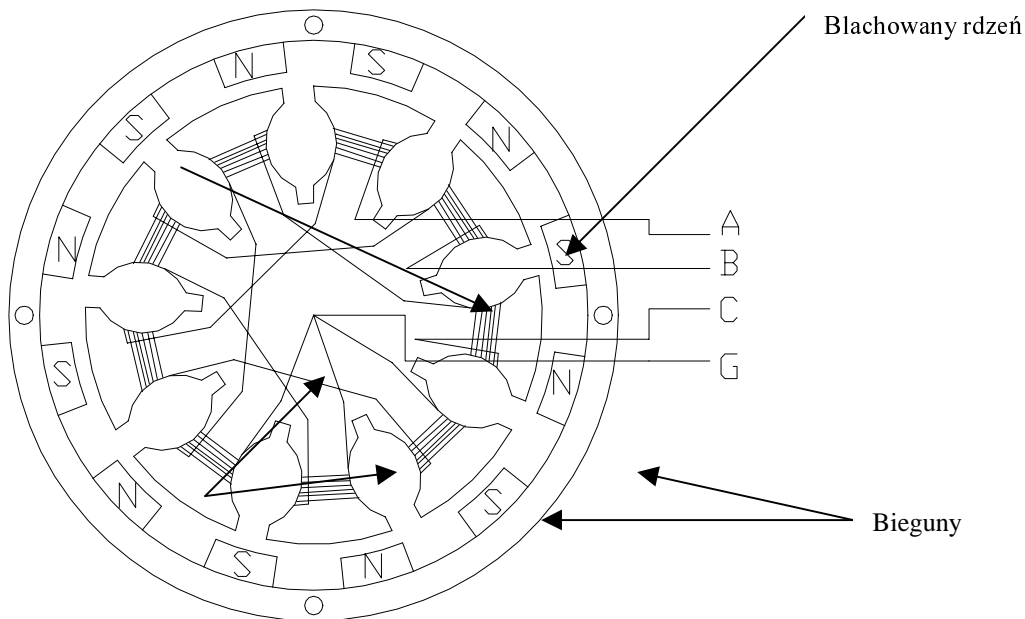
5. Budowa stojana

Stojan stanowi wewnętrzną część silnika. Zbudowany jest z blachowanego rdzenia, z którego wystaje dziewięć biegunów, na które zostały nawinięte uzwojenia. Uzwojenie stojana jest trójfazowe połączone w gwiazdę z wyprowadzonymi czterema przewodami, początkami uzwojeń i punktem gwiazdowym uzwojenia. Na rysunku 2-4 przedstawiono schemat elektryczny uzwojenia stojana.



Rys. 4. Schemat elektryczny uzwojenia stojana

Litery A, B i C oznaczają wyprowadzenia końców uzwojeń a litera G wyprowadzenie punktu gwiazdowego uzwojenia.



Rys. 5. Budowa stojana pokazanego wewnątrz wirnika

Na rys. 5 pokazano budowę stojana umieszczonego wewnątrz wirnika, na każdym biegunie nawinięte są uzwojenia połączone szeregowo po trzy na jedną fazę.

6. Zasada działania

Moment obrotowy w bezszczotkowym silniku prądu stałego z magnesami trwałymi jest generowany dzięki oddziaływaniu pomiędzy biegunami stojana a magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku. Moment ten można wyrazić następującą zależnością:

$$m_e = i_q * \Psi_d + (L_d - L_q) * i_d * i_q \quad (1)$$

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

$$\Psi\alpha = \frac{\sqrt{2} \left(\Psi a + L_s * ia - \frac{1}{2} (\Psi b + \Psi c + L_s(ib + ic)) \right)}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\Psi\beta = \frac{(\Psi b - \Psi c + L_s * (ib - ic))}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$\Psi d = \Psi\alpha * \cos \phi + \Psi\beta * \sin \phi \quad (4)$$

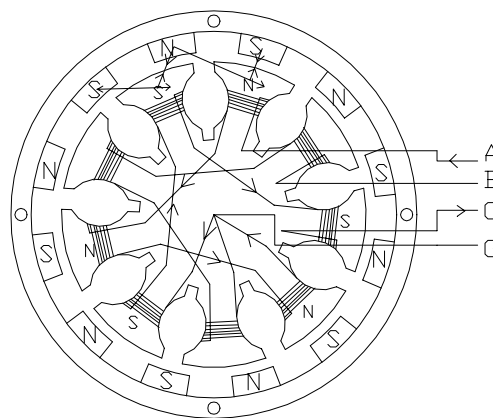
$$\Psi q = -\Psi\alpha * \sin \phi + \Psi\beta * \cos \phi \quad (5)$$

$$i\alpha = \frac{\sqrt{2} \left(ia - \frac{1}{2} (ib + ic) \right)}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$i\beta = \frac{ib - ic}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

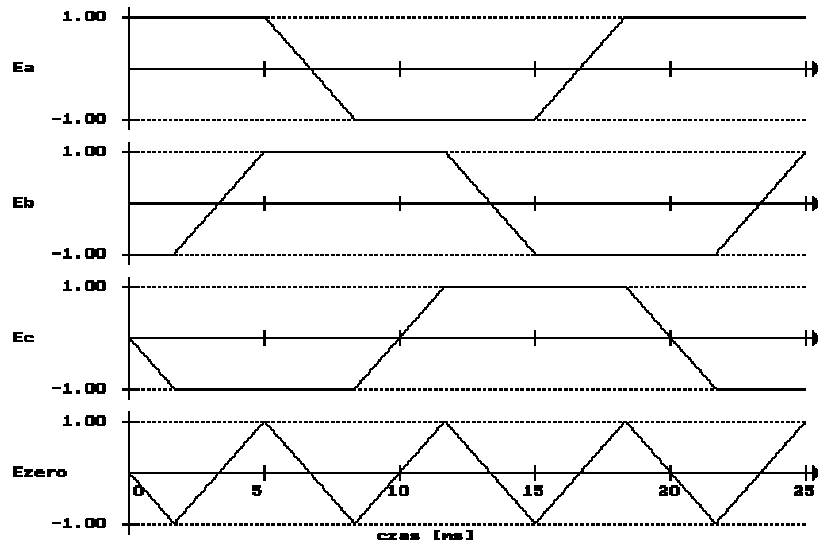
- Gdzie: ia, ib, ic - prądy w poszczególnych fazach
 $\Psi a, \Psi b, \Psi c$ - strumienie magnetyczne od magnesów trwałych w poszczególnych fazach wirnika
 L_s - jest indukcyjnością stojana i jest $L_d=L_q=L_s$
 ϕ - kat położenia wirnika
 Ψd - strumień magnetyczny w osi d.

Na rysunku 2-6 przedstawiono ogólną zasadę generowania momentu w badanym silniku. Zaznaczono na nich kierunki przepływu prądu w cewkach w zależności od położenia wirnika we wszystkich sześciu fazach pracy falownika oraz siły działające pomiędzy magnesami trwałymi a biegunami wirnika.



Rys. 6. Zasada generowania momentu

W danej chwili prąd płynie tylko przez dwie fazy. Taki sposób sterowania i załączania kluczy falownika jest charakterystyczny dla bezszczotkowych silników prądu stałego. Posiada on trapezoidalny rozkład pola magnetycznego w wyniku, czego przebieg sił elektromotorycznych w poszczególnych fazach ma kształt trapezoidalny, co pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Przebieg sił elektromotorycznej w fazach silnika - Ea, Eb, Ec oraz w punkcie gwiazdowym - Ezero

Taki kształt przebiegu sił elektromotorycznej wymusza odpowiednie załączanie kluczy falownika. Kolejne sekwencje załączania kluczy falownika powinny być zmieniane w chwili, gdy przebieg Ezero (rysunek 2-7) uzyskuje maksimum lub minimum. Wraz z rozwojem techniki mikroprocesorowej poszukiwane są różne sposoby rozwiązywania tego problemu. W niniejszej pracy zostaną pokrótce przedstawione niektóre z tych rozwiązań.

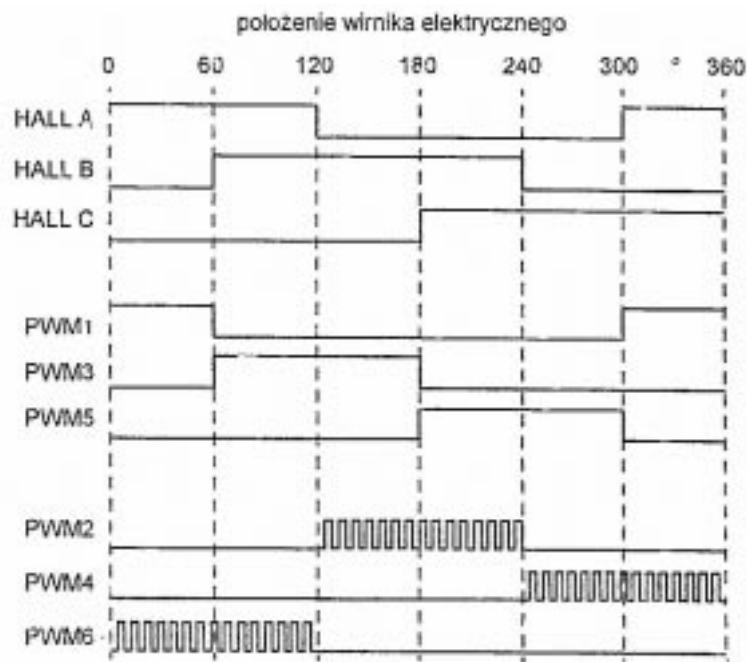
Od samego początku istnienia maszyn, które wykorzystywały komutacje elektroniczną szukano jak najlepszego sposobu wykrywania położenia wału maszyny gdyż właśnie na podstawie tej informacji następuje przełączenie kluczy falownika.

7. Metody sterowania

Bezczotkowe silniki z magnesami trwałymi można podzielić na dwa rodzaje ze względu na sposób sterowania: bezszczotkowe silniki prądu stałego oraz silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Podział ten wiąże się ściśle z ich konstrukcją gdyż silniki o sinusoidalnym rozkładzie pola są najczęściej sterowane jako silniki synchroniczne, natomiast maszyny o trapezoidalnym rozkładzie pola jako silniki prądu stałego. Podstawowym problemem jest wyznaczenie położenie wirnika, które jest potrzebne do prawidłowego załączenia kolejnych faz uzwojeń wirnika. W literaturze można spotkać trzy różne metody rozwiązywanie tego problemu a mianowicie: pomiar prędkości lub położenia wirnika za pomocą czujnika, wyznaczanie położenia wirnika poprzez pomiar odpowiednich wielkości (np. siły elektromotorycznej) oraz poprzez wyliczenie prędkości przez układ sterujący wykorzystujący do tego model matematyczny danej maszyny. Dwie ostatnie metody wymagają użycia odpowiednich wydajnych układów mikroprocesorowych, które będą w stanie wyliczyć wszystkie niezbędne informacje w odpowiednio krótkim czasie i dodatkowo sterować załączaniem kluczy falownika.

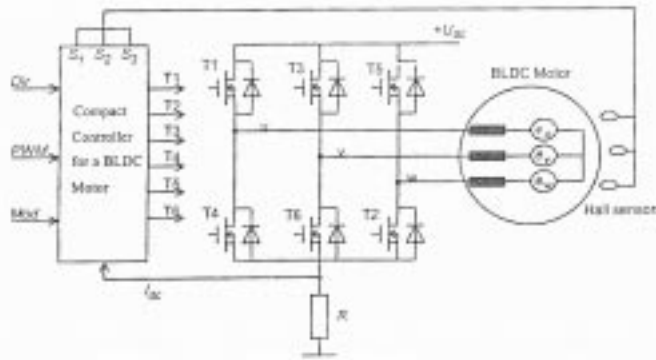
8. Sterowanie z wyznaczeniem położenia wirnika przy użyciu czujników

W [6] i [10] przedstawiono sposób wyznaczenia położenia wirnika za pomocą czujników hallotronowych. Czujniki wykrywają położenia magnesów trwałych względem cewek poprzez pomiar indukcji pola magnetycznego. Rozmieszczono je na tarczy stojana w odległościach 60° kąta elektrycznego. Dzięki czujnikom hallotronowym zapewniony jest najprostszy sposób pomiaru położenia wirnika i komutacji tranzystorów w mostku. Z drugiej jednak strony rozwiązanie to uniemożliwia zastosowanie bardziej złożonych algorytmów sterowania napędem, gdyż układ potrafi określić położenie wirnika z dokładnością do 60° elektrycznych, co można zaobserwować na rysunku 3-1.



Rys. 8. Układ sygnałów pomiarowych i sterujących

Na rys. 8. przedstawiono układ sygnałów pomiarowych i sterujących bezszczotkowego silnika prądu stałego. Sygnały uzyskane z hallotronów określają położenia wirnika w silniku i w przypadku sterowania silnikiem poprzez napięciową falę prostokątną, wyznaczają punkty komutacyjne w przekształtniku. Rys. 9 pokazuje przykładowy układ sterowania tego typu silnikiem za pomocą czujników Hall'a.

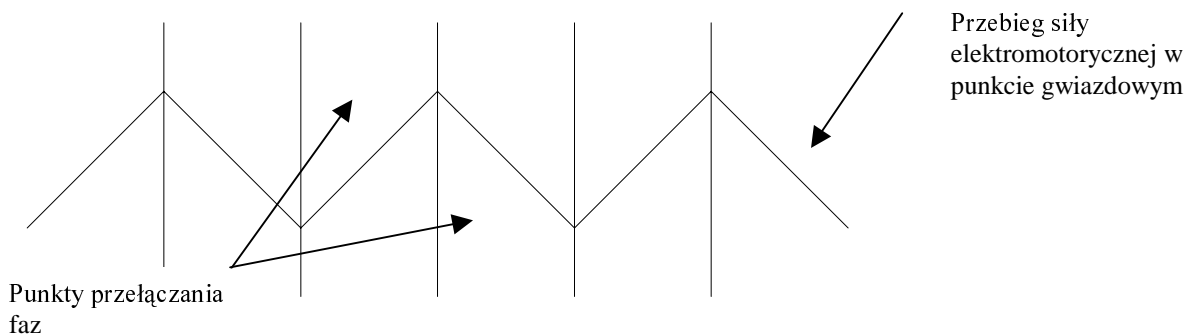


Rys. 9 Układ sterowania silnikiem za pomocą czujników Hall'a

Zaletą zastosowania hallotronów do pomiaru położenia wirnika są małe wymagania wobec układu logicznego. Spowodowane jest to kompleksową informacją, jaką dostarczają do układu logicznego czujniki na podstawie sygnałów. Układ logiczny bez dodatkowych skomplikowanych obliczeń jest w stanie określić położenie wirnika z dokładnością wystarczającą mu na sterowanie silnikiem. Czujniki można bezpośrednio podłączyć do układu logicznego sterującego załączanie kluczy falownika. Niestety ta prostota pociąga za sobą stosunkowo wysoką awaryjność i konieczność wykonania dodatkowych przeróbki silnika w celu zamontowania hallotronów wraz z koniecznością prowadzenia dodatkowych przewodów do czujników. Przewagą tego sposobu sterowania jest ciągła wiedza o aktualnym położeniu wirnika nawet przy zatrzymanym wirniku. Układ stale otrzymuje informację o położeniu wirnika gdyż nawet przy zatrzymanym silniku i wyłączonym zasilaniu w środku silnika można pomierzyć indukcje magnetyczną od magnesów trwałych.

Innym rozwiązaniem jest bezpośredni pomiar prędkości i na jej podstawie ustalanie położenia wirnika. Przykładem może być układ przedstawiony w [7], gdzie użyto encodera do pomiaru zmiany położenia wału maszyny. Układ ten podobnie do poprzedniego ma wady związane z częściami mechanicznymi, które najszybciej ulegają awarii. Dodatkowo przy pomiarze prędkości konieczny jest bardziej zawansowany układ logiczny potrafiący przekształcić zmianę położenia wału na prędkość obrotową i na podstawie tego pomiaru określić dokładne położenie wirnika.

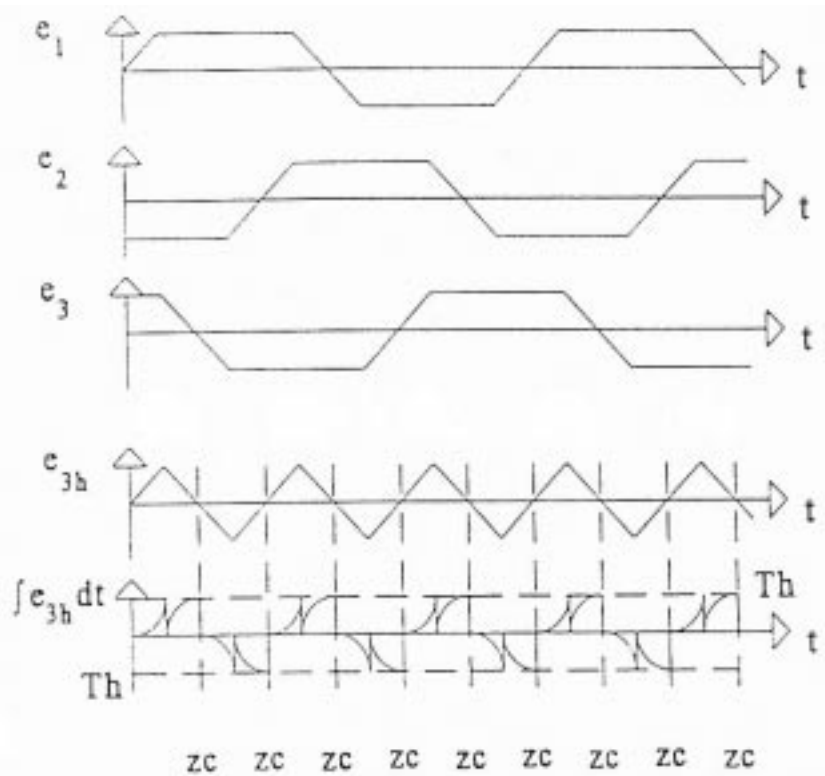
9. Sterowanie z wyznaczeniem położenia wirnika przez pomiar wielkości elektrycznych w wolnej fazie lub punkcie gwiazdowym



Rys. 10. Przebieg siły elektromotorycznej w punkcie gwiazdowym

Dzięki takiemu kształtowi stosunkowo łatwo jest wyznaczyć moment, w którym należy załączyć kolejne fazy uzwojeń stojana. Moment ten następuje w chwili, gdy wartość siły elektromotorycznej osiąga ekstremum. Niestety rzadko spotyka się silniki z wyprowadzonym punktem gwiazdowym w celu pomiaru siły elektromotorycznej a jeśli już taki przewód jest wyprowadzony to rzeczywisty przebieg nie jest tak gładki i moment, w którym przebieg osiąga ekstremum nie jest jednoznaczny.

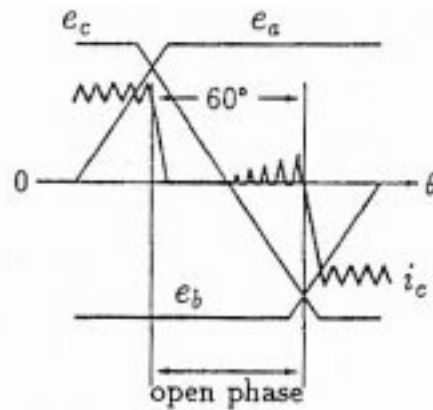
W [4] i [5] przedstawiono dwa odmienne sposoby wyznaczania położenia wirnika. Jednym ze sposobów jest pomiar i odpowiednia obróbka przebiegu siły elektromotorycznej w wolnej fazie. Taki właśnie sposób został pokazany w [4] gdzie wykorzystano właściwość trzeciej harmonicznej siły elektromotorycznej w otwartej fazie, której przebieg pokrywa się z przebiegiem siły w punkcie gwiazdowym silnika. Sposób wyznaczania momentu przełączania faz został przedstawiony na rysunku 3-4. Moment przełączania faz następuje w chwili, gdy scałkowana wartość siły elektromotorycznej w otwartej fazie osiągnie określony poziom zaznaczony na rysunku jako T_h . Poziom ten jest osiągnięty, co 30° elektrycznych.



Rys. 11. Sposób sterowanie wykorzystujący 3 harmoniczną

Drugi sposób został przedstawiony w [5], autorzy wykorzystali pomiar prądu do uzyskania informacji o aktualnym położeniu wirnika. Rysunek 3-5 przedstawia ogólną zasadę tego pomysłu. W momencie, gdy prąd w wolnej fazie zaczyna oscylować wiadomo, że wirnik obrócił się o 30° elektrycznych i o kolejne 30° musi się obrócić, aby nastąpiło załączenie kolejnej fazy. Oba te sposoby wymagają ciągłego pomiaru trzech różnych wielkości jest to szczególnie uciążliwe przy pomiarze prądu, który wymaga zastosowania drogich

przetworników LEM i przetworników analogowo-cyfrowych o bardzo wysokiej częstotliwości próbkowania.

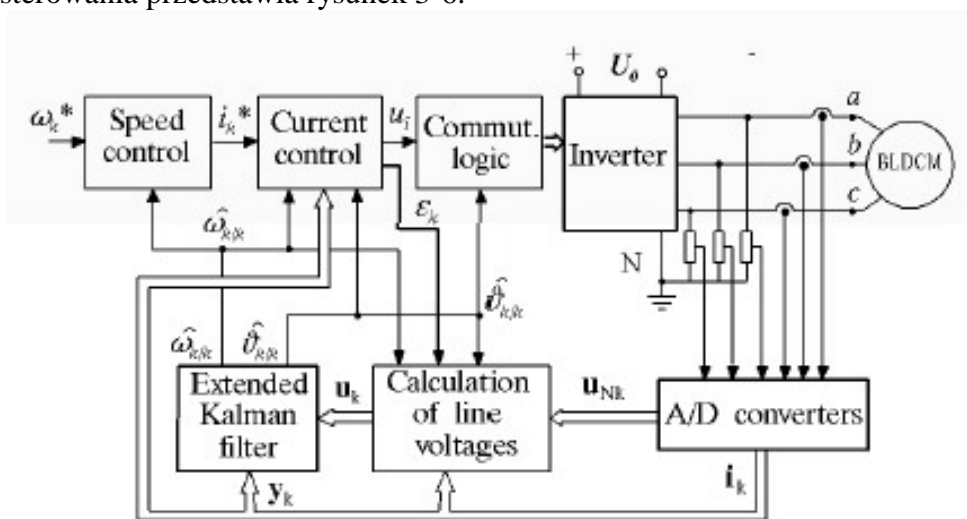


Rys. 12. Wyznaczanie położenia wirnika

10. Sterowanie z wyznaczeniem położenie wirnika z wykorzystaniem modelu matematycznego silnika

Metoda ta ma największe wymagania dotyczące układu logicznego, gdyż do sterowania maszynami z elektroniczną komutacją wykorzystuje ich model matematycznych. Sposób ten oprócz szybkiego układu logicznego wymaga dokładnego opisu matematycznego zjawisk zachodzących w maszynie oraz stałych fizycznych charakteryzujących dany silnik takich jak: rezystancja stojana, indukcyjność poszczególnych faz, strumień magnetyczny od magnesów trwałych, moment bezwładności itp. Układ logiczny w czasie rzeczywistym na podstawie napięć i prądów zasilających wyznacza położenie wirnika i oblicza pozostałe zmienne niezbędne do prawidłowego sterowania silnikiem. Sterowanie za pomocą modelu matematycznego jest cieszy się coraz większym zainteresowaniem za sprawą rozwoju techniki mikroprocesorowej. Pojawienie się bardzo szybkich procesorów sygnałowych, które potrafią wyliczyć wszystkie niezbędne zmienne w odpowiednio krótkim czasie, umożliwiło szerokie stosowanie tej metody.

W [8] przedstawiono zastosowanie tej metody do sterowania BLDCM. Ogólną idee tego sposobu sterowania przedstawia rysunek 3-6.



Rys. 12. Schemat bezczujnikowego pomiaru prędkości

Układ ten można podzielić na kilka głównych części: wysoko prądową (zasilacz prądu stałego, falownik i silnik), układ kontrolny (regulatory prądu i prędkości oraz układ logiczny sterujący załączaniem kluczy falownika), pomiarową (układy pomiaru napięcia i prądu oraz przetwornik analogowo-cyfrowy) oraz układ zawierający filtr Kalmana i blok obliczający napięcia średnie w czasie rzeczywistym. W beczujnikowym układzie wykorzystano następujące zmienne:

- mierzone ($u_{Nk}=[u_{aN} \ u_{bN} \ u_{cN}]^T$ napięcia faz względem punktu neutralnego, wektor prądów $i_k=[i_a \ i_b \ i_c]^T$),
- wyliczane (prędkość kątową ω i położenie wirnika ϑ)
- zmienne wymagane do sterowania układem (ω^* , i_k^* , u_i^* , ε_k gdzie: ω^* , i_k^* są wielkościami zadanymi, u_i^* sygnał sterujący tranzystorami, ε_k cykl pracy).

Wektor napięć jest definiowany na podstawie napięć średnich wyliczonych z k-próbek $u_k=[u_{ab} \ u_{bc} \ u_{ca}]^T$. Do filtru Kalmana jest doprowadzana zmienna $y_k=i_k$.

Sam układ napędowy został opisany następującymi równaniami różniczkowymi:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[\frac{u_{ab} - u_{ca}}{3} - R_s i_a - k_e \omega (a_{11} - a_{12} (\vartheta - \theta_{kom})) \right] \quad (8)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[\frac{u_{bc} - u_{ab}}{3} - R_s i_b - k_e \omega (a_{21} - a_{22} (\vartheta - \theta_{kom})) \right] \quad (9)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[\frac{u_{ca} - u_{bc}}{3} - R_s i_c - k_e \omega (a_{31} - a_{32} (\vartheta - \theta_{kom})) \right] \quad (10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (T_e - T_L) \quad (11)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega \quad (12)$$

W powyższych równaniach użyto następujących zmiennych:

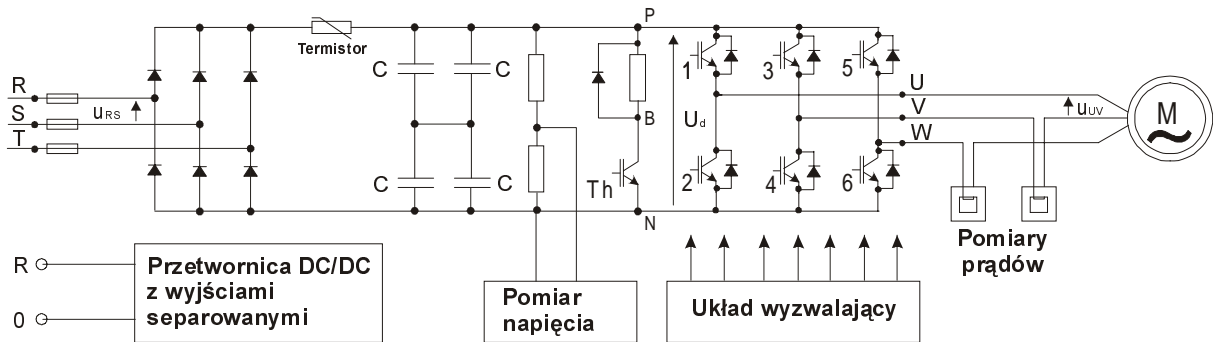
- u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} - napięcia międzyfazowe;
- i_a, i_b, i_c - prądy w poszczególnych fazach;
- ω - prędkość kątowna;
- ϑ - położenie wirnika;
- J - moment bezwładności;
- p - liczba par biegunów;
- θ , współczynniki $a_{11} - a_{32}$ są zależne od położenia wirnika;
- T_e - moment elektromotoryczny;
- T_L - moment obciążenia;
- R_s - rezystancja stojana;
- L_s - indukcyjność stojana;
- k_e - pochodna strumienia magnetycznego powstałego od magnesów trwałych;

Podstawą działania tego układu jest filtr Kalmana, który na podstawie pomierzonych napięć oraz prądów wyznacza położenie i prędkość wirnika. Wielkości te są przekazywane do

układu sterującego oraz układu obliczającego napięcia u_k . Wielkością zadawaną jest prędkość kątowa przekazywana do regulatora prędkości.

11. Separowane zasilanie sterowników tranzystorów

W układach przekształtnikowych występuje problem związany z koniecznością zapewnienia pomocniczego układu zasilania układów wzmacniaczy tranzystorowych. Potencjał odniesienia sygnału sterującego (źródła lub emitera) dla tranzystora dołączonego drenem lub kolektorem do dodatniego bieguna źródła zasilania, zmienia się skokowo przy przełączaniu o pełną wartość napięcia zasilania.

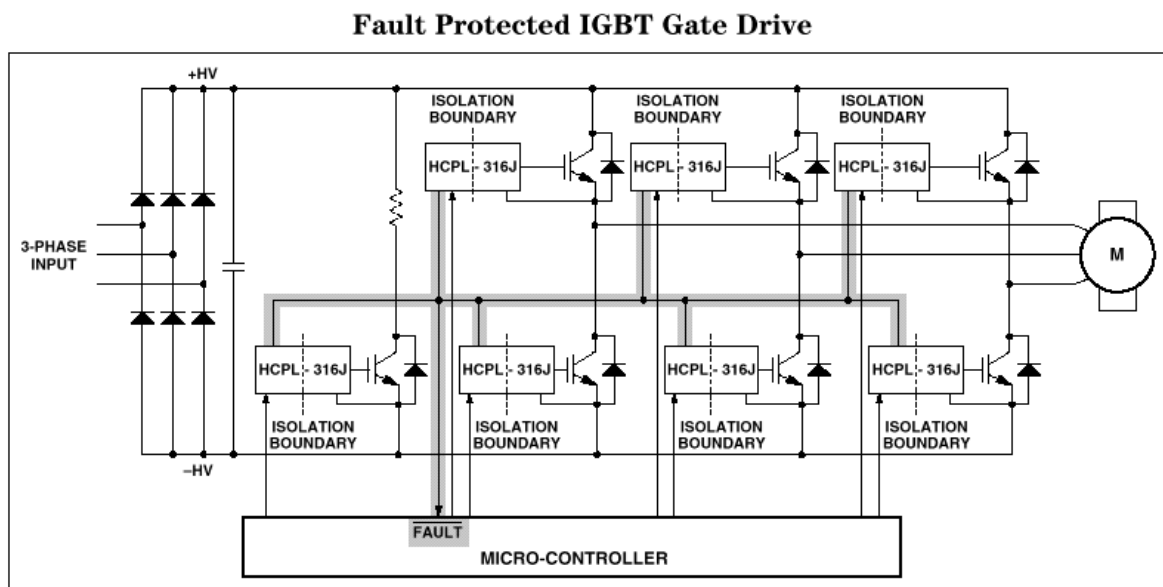


Rys. 13. Schemat przekształtnika AC/DC/AC

Dla układów mniejszych mocy pomocnicze zasilanie powinno dostarczyć 4 napięcia separowane:

- jedno, wspólne napięcie dla trzech tranzystorów dolnych i tranzystora hamującego,
- po jednym, osobnym napięciu dla tranzystorów górnych.

Dla dużych mocy falownika stosuje się zasilacze dostarczające 6 napięć separowanych.

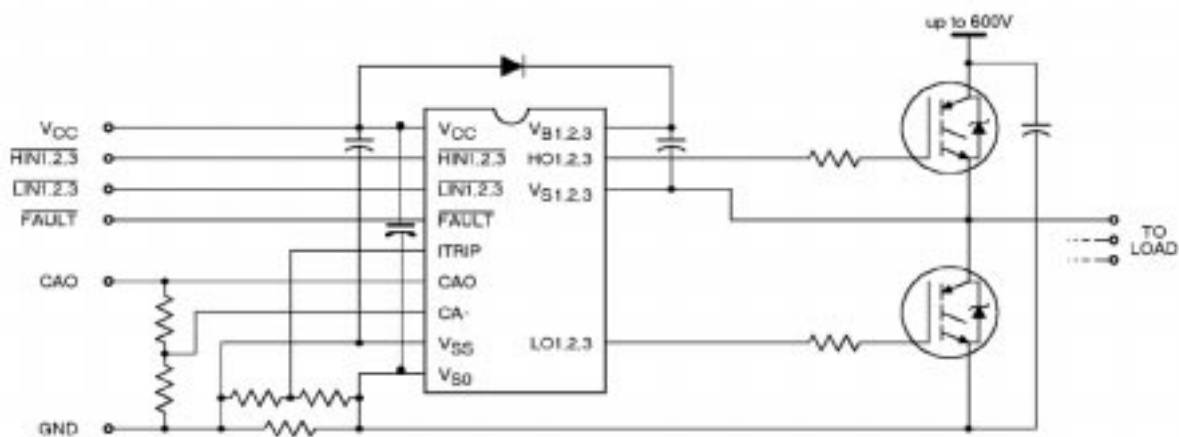


Rys. 14. Separacja galwaniczna sygnałów sterujących w przekształtniku AC/DC/AC

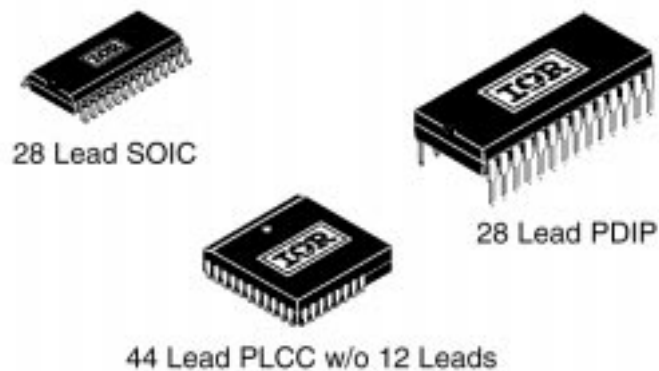
12. Zintegrowany sterownik dla trójfazowego przekształtnika (Układ International Rectifier IR2130/IR2132)

W układach małej mocy stosowane jest prostsze i tańsze rozwiązanie wytwarzania napięć pomocniczych dla wzmacniaczy tranzystorowych. Stosuje się układ z pośrednim zasilaniem sterowników tranzystorów (tzw. technika „bootstrap”) z ładowaniem wstępnym kondensatorów i wykorzystaniem ich ładunku do zasilania wzmacniaczy tranzystorów górnych. Potencjał odniesienia tranzystora górnego jest potencjałem pływającym.

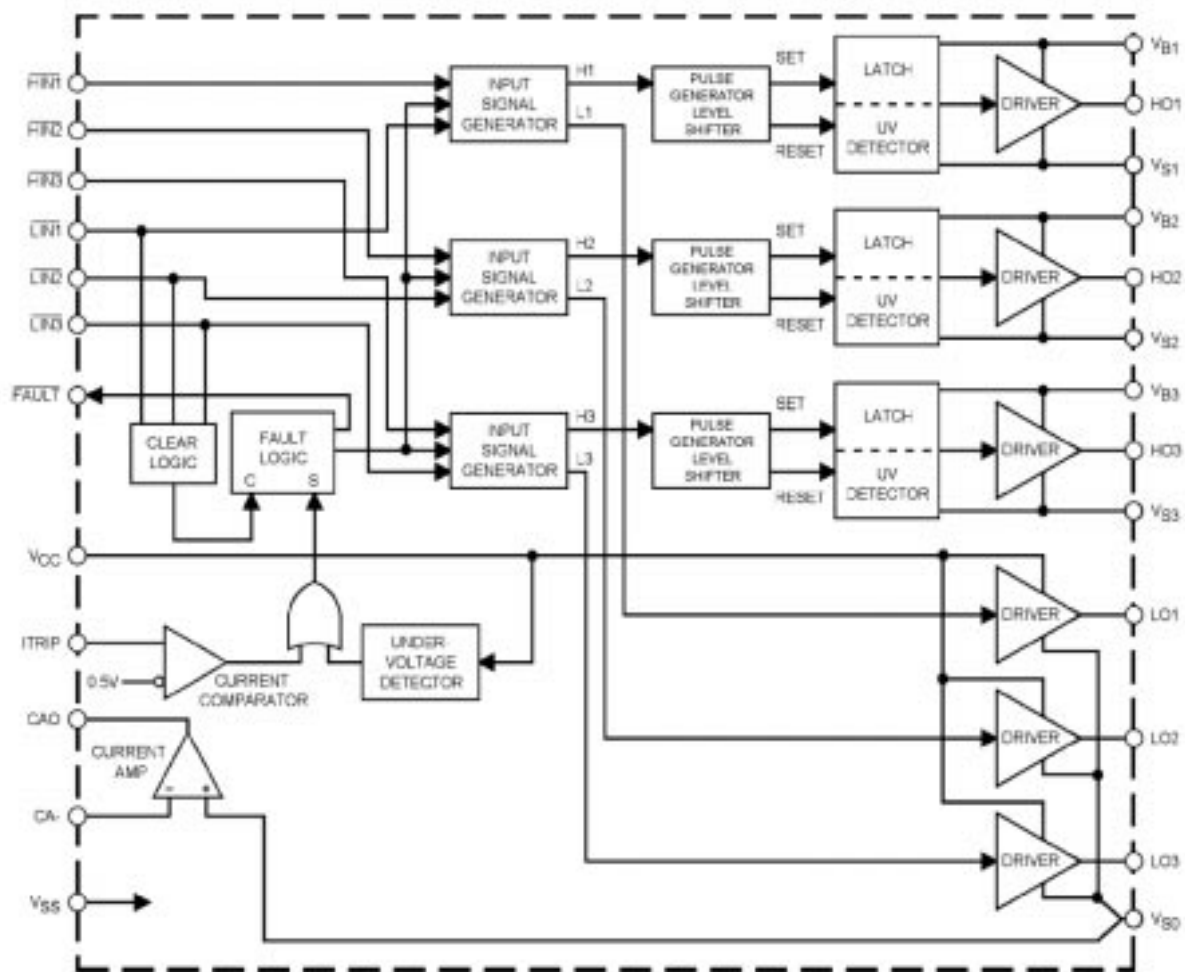
Przykładem układu wykorzystującego technikę bootstrap jest układ firmy International Rectifier typu IR2130 lub 2132 będący zintegrowanym draywerem dla sześciu tranzystorów MOSFET. Układ ten wymaga tylko jednego napięcia zasilającego. Posiada również wbudowane funkcje zabezpieczeń.



Rys. 15. Zasilanie wzmacniaczy tranzystorowych (driajwerów) w technice "bootstrap"



Rys. 16. Obudowy układów IR2130/IR2132



Rys. 17. Schemat blokowy układu IR2130

Zabezpieczenia realizowane w IR2130:

- podnapięciowe (zbyt niskie napięcie zasilania układu IR2130)
- nadprądowe.

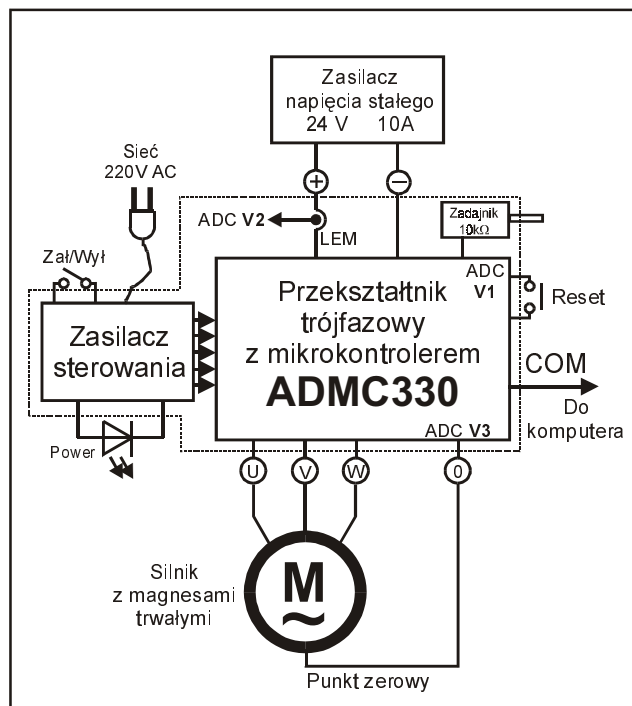
Elementy istotne dla układu „bootstrap” czyli kondensatory i diody muszą być odpowiednio dobrane.

13. Układy laboratoryjne

W laboratorium znajdują się dwa przekształtniki przeznaczone do zasilania silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi:

- układ fabryczny zbudowany w oparciu o przekształtnik trójfazowy służącym do regulacji częstotliwości oraz wejściowy układ przerywacza służący do regulacji prądu pobieranego przez silnik.
- układ laboratoryjny zbudowany jako przekształtnik trójfazowy regulujący zarówno częstotliwości i prąd silnika.

Układ laboratoryjny wykorzystuje technikę "bootstrap" oraz układ IR2130. Do sterowania układem służy mikrokontroler ADMC330 współpracujący z komputerem PC.



Rys. 18. Schemat połączeń układu laboratoryjnego

14. Program ćwiczenia:

Dla układu fabrycznego przekształtnika:

1. Sprawdzić połączenia układu i narysować schemat układu.
2. Zapoznać się z działaniem i obsługą przemiennika.
3. Wyznaczyć charakterystyki mechaniczne układu.
4. Przeprowadzić obserwację i rejestrację przebiegów:
 - siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach silnika,
 - prądu wejściowego przekształtnika,
 - prądu fazowego silnika,
 - napięcia wejściowego przekształtnika (mierzonego względem bieguna - zasilacza),
 - napięcia w punkcie gwiazdowym uzwojenia (mierzonego względem bieguna - zasilacza),

Dla układu laboratoryjnego przekształtnika:

5. Zapoznać się z budową i obsługą przekształtnika.
6. Przeprowadzić analizę działania układu IR2130.
7. Zarejestrować przebiegi napięć i prądów w układzie.
8. Zarejestrować przebiegi sygnałów sterujących tranzystorami.
9. Wykorzystując program symulacyjny obejrzeć przebiegi prądów, momentu i innych zmiennych układu z silnikiem bezszczotkowym.
10. Narysować schemat blokowy układu regulacji.
11. Narysować na wspólnym wykresie przebieg prądu fazowego silnika i napięcia w punkcie gwiazdowym (oznaczyć chwile przełączeń faz).

Parametry silnika z magnesami trwałymi:

- napięcie zasilania przekształtnika 24 [V] (napięcie stałe),
- maksymalna moc silnika 300 [W]

Procedura uruchomienia układu fabrycznego:

- sprawdzić ustawienie przycisków załączenia przekształtnika (czarny) i hamowania (czerwony) na 0,
- ustawić napięcie 24 [V] i ograniczenie prądowe 20 [A] na zasilaczu prądu stałego,
- załączyć silnik tarczowy (niebieski) i ustawić maksymalną prędkość obrotową,
- załączyć przekształtnik silnika bezszczotkowego (czarnym przyciskiem),
- zmianę obciążenia silnika bezszczotkowego uzyskuje się przez regulację wysterowania silnika tarczowego za pomocą potencjometru lub przez zmianę rezystancji obciążenia.

15. Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu

1. Narysować schemat połączeń układu pomiarowego z oznaczeniem zakresów pomiarowych przyrządów.
2. Na podstawie pomiarów sporządzić charakterystyki mechaniczne silnika.
3. Opisać działanie układu i sposób sterowania silnikiem bezszczotkowym.
4. Wyjaśnić kształt przebiegów napięć i prądów.

16.Literatura

1. Richard G. Lyons: „WPROWADZENIE DO CYFROWEGO PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW” Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999
2. Mieczysław Nowak, Roman Barlik: „PORADNIK INŻYNIERA ENERGOELEKTRONIKA” Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998
3. Marek Karpiński: Praca dyplomowa „ZASTOSOWANIE PROCESORA ADMC330 DO STEROWANIA BEZSZCZOTKOWYM SILNIKIEM PRĄDU STAŁEGO” Gdańsk 1999
4. H.R. Andersen, J.K. Pedersen „SENSORLESS ELBERFELD CONTROL OF BRUSHLESS DC-MOTORS FOR ENERGY-OPTIMIZED VARIABLE-SPEED HOUSEHOLD REFRIGERATORS” EPE’97 Trondheim
5. Satoshi Ogasawara, Hirofumi Akagi „AN APPROACH TO POSITION SENSORLESS DRIVE FOR BRUSHLESS DC MOTORS” IEEE 1991
6. Jing Zhang, Michael Schroff „CURRENT CONTROL OF THREE-PHASE BRUSHLESS DC DRIVES WITH DC-LINK CURRENT MEASUREMENT” INTELLIGENT MOTION JUNE 1997
7. Bo Zhou, Xianxiang Li, Chengzhong Wang „AN INTELLIGENT SPEED CONTROL SYSTEM FOR SQUARE-WAVE RARE-EARTH PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR” IPEMC ‘97
8. B. Terzic, M. Jadric „SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE WITH IMPROVED SPEED ESTIMATION ACCURACY USING STATOR RESISTANCE ESTIMATION” EPE’99 Lausanne
9. Ernest Mendrela, Józef Moch, Piotr Paduch „TARCZOWY BEZSZCZOTKOWY SILNIK PRĄDU STAŁEGO Z UZWOJENIEM JEDNOPASMOWYM” Wiadomości elektrotechniczne 2000/2
10. Ryszard Drzewoski, Jerzy Jelonkiewicz, Ernest Mendrela „BEZPRZEKŁADNIOWY NAPĘD ELEKTRYCZNY POJAZDÓW Z SILNIKIEM TARCZOWYM” Wiadomości elektrotechniczne 1999/4