

PIOTR DROZDOWSKI\*

NAPĘD POJAZDÓW Z WIELOFAZOWYM SILNIKIEM  
INDUKCYJNYM KLATKOWYMVEHICLE'S DRIVE WITH A MULTIPHASE CAGE  
INDUCTION MOTOR

## Streszczenie

W pracy przedstawiono propozycję napędu elektrycznego pojazdów z wielofazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym, pracującym przy różnych kolejnościach fazowych napięć zasilających i regulowanej częstotliwości. Skokowe przełączanie kolejności napięć powoduje skokową zmianę prędkości idealnego biegu jałowego poprzez zmianę liczby biegunów pola magnetycznego przy tej samej częstotliwości i napięciu. Odbywa się to na drodze sterowania wielofazowego falownika napięcia. Stosując silniki z uzwojeniami fazowymi skojarzonymi w grupy cięciwowe, umożliwia to zwiększanie momentu elektromagnetycznego silnika niemal proporcjonalnie do skokowo zmniejszonej prędkości pola. Z punktu widzenia wału napędowego silnik zachowuje się prawie tak, jakby był wyposażony w przełączalną skrzynię przekładniową, a dodatkowo dla każdej kolejności prąd i napięcie silnika pozostaje na niemal tym samym poziomie. Taki napęd może być zastosowany do samochodów elektrycznych, w których istotne jest zastosowanie przekształtnika nieprzewymiarowanego prądowo oraz zapewnienie pracy tranzystorów falownika przy ograniczonej strumieniu prądów. Zwykle stanowi to uzasadnienie dla stosowania w tych pojazdach mechanicznej skrzyni biegów. Dodatkowo, napęd taki może być zastosowany w wielosilnikowych pojazdach trakcyjnych, gdyż przełączanie „biegów” odbywa się poprzez sterowanie falowników zasilających. Może mieć on również zastosowanie w uniwersalnych pojazdach trakcyjnych pracujących jako lokomotywy manewrowe lub szybkie.

*Słowa kluczowe: wielofazowy silnik indukcyjny klatkowy, pojazdy elektryczne, sterowanie polowo zorientowane, mechaniczna skrzynia przekładniowa*

## Abstract

In this paper the drive with a multiphase cage induction motor has been proposed. The motor is designed to vehicles operating normally with a switched gearbox, since its operation is similar in some range. In the proposed solution the change of gear is realised by specific control of the motor. The matter consists in stepper change of the no load speed by changing the sequence of supplying voltages – switching of the sequence changes the total number of magnetic field poles [14]. In this way, the operation with a constant power is assured – the lower speed the greater torque at the same motor current (Fig. 3). This is possible under scalar and vector control of the drive (Figs. 4, 5). Such a solution does not demand the supplying inverter designed for great currents. So, this can be very profitable for electrical cars and universal traction howlers. Since the gear is electrically controlled these motors can be mounted into multi-drive traction vehicles. Additionally the operation with the switched voltage sequence protects the converter (usually the VS inverter [16]) against great derivative of currents.

*Keywords: multiphase cage induction motor, electrica vehicle, field-oriented control, gearbox*

\* Dr hab. inż. Piotr Drozdowski, prof. PK, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

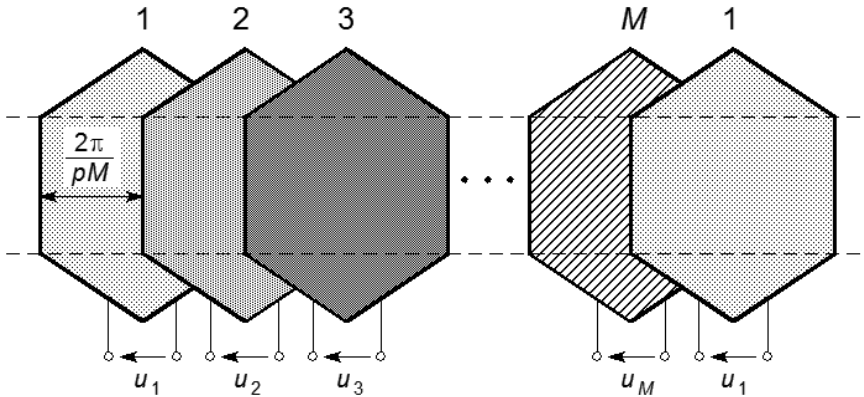
## 1. Wstęp

W napędzie pojazdów elektrycznych szynowych oraz w trolejbusach stosuje się silniki sprzęgnięte bezpośrednio z kołami pędnymi za pomocą stałej przekładni mechanicznej. W przypadku silników indukcyjnych klatkowych takie rozwiązanie umożliwi zwiększenie momentu obrotowego jedynie poprzez zwiększenie prądu silnika przy stałej wartości strumienia magnetycznego. Stosuje się przy tym sterowanie wektorowe lub skalarne. Zwiększenie długości wektora strumienia jest ograniczone nasyceniem obwodu magnetycznego. Wynika stąd, że zawory półprzewodnikowe falownika muszą być zwymiarowane prądowo ze względu na maksymalny moment silnika niezależnie od prędkości. Oznacza to, że przy małych prędkościach moc maksymalna napędu będzie proporcjonalnie mniejsza do ich wartości. Zwiększenie mocy jest możliwe po zastosowaniu wielostopniowej przekładni mechanicznej. Rozwiązanie takie stosuje się w niektórych samochodach elektrycznych, co przynosi istotne korzyści ze względu na ograniczenia stwarzane przez zasilanie bateryjne i stosowanie tranzystorów na mniejsze prądy. Występują przy tym mniejsze udary prądów i łatwiejsze jest zabezpieczenie tranzystorów. Regulacja napędu wymaga w takim przypadku zmian przełożenia mechanicznego, podobnie jak w samochodach spalinyowych. Zastosowanie skrzyni przekładniowej w napędzie trakcyjnym kolejowym lub miejskim przyniosłoby korzyści w postaci pojazdów bardziej uniwersalnych, przystosowanych do poruszania się po trasach o wysoce zróżnicowanej charakterystyce. Nie stosuje się jednak takiego rozwiązania ze względu na wielosilnikowe napędy tych pojazdów.

W niniejszej pracy przedstawiono rozwiązanie alternatywne polegające na zastosowaniu wielofazowych silników indukcyjnych klatkowych, o liczbie faz większej niż trzy, w których można dokonywać przełączania kolejności zasilania uzwojeń fazowych, a tym samym uzyskiwać efekt bardzo zbliżony do przełączania za pomocą mechanicznej skrzyni przekładniowej. Takie rozwiązanie nie stwarza ograniczeń przy budowie napędu wielosilnikowego, gdyż przełączanie kolejności następuje jedynie poprzez odpowiednie wysterowanie falowników zasilających, do których mogą być dołączone grupy silników. Zagadnienia te zostały omówione zbiorczo w pracy [14] oraz w pracach wcześniejszych wymienionych w literaturze [1, 2, 4, 7, 9]. W referacie [16] prezentowanym na konferencji SEM-TRAK przedstawiono różne sposoby zasilania silników wielofazowych w napędzie trakcyjnym, w tym wykorzystanie silnika 9-fazowego do napędu tzw. pojazdu dwusystemowego zasilanego z sieci tramwajowej i kolejowej.

## 2. Właściwości napędowe silników indukcyjnych wielofazowych

Budowa silników indukcyjnych wielofazowych o liczbie faz większej niż trzy ma sens, gdy liczba faz  $M = 5$ . Uzwojenia silników 6-fazowych ( $M = 6$ ) są czasami traktowane jako podwójny układ 3-fazowy, gdzie oba uzwojenia 3-fazowe mogą być przesunięte względem siebie symetrycznie o  $60^\circ_{el}$  lub niesymetrycznie o  $30^\circ_{el}$ . Z drugiej strony, z obu układów 3-fazowych można stworzyć uzwojenie o przełączalnej liczbie par biegunów  $p$  w stosunku 1 do 2. Silników 7-fazowych nie buduje się ze względów konstrukcyjnych, natomiast dla silników 8-fazowych należałoby zaprojektować osobny obwód magnetyczny. Najłatwiej zbudować silniki o liczbie faz, która jest całkowitą wielokrotnością liczby 3, np.  $M = 9$ ,  $M = 12$ ,  $M = 15$ , gdyż można w tym celu wykorzystać konstrukcje silników 3-fazowych.



Rys. 1.  $M$ -fazowy układ uzwojeń o liczbie par biegunów  $p = 1$  – grupy cewek stanowiących pasma fazowe mają rozpiętość cięciwową

Fig. 1.  $M$ -phase winding system for pole pair number  $p = 1$  – the phase groups of pitched coils

Uzwojenie wielofazowe jest zasilane za pomocą wielofazowego źródła napięcia lub prądu. W praktyce źródłem takim są falowniki wielofazowe – najprostszy konstrukcyjnie jest symetryczny  $M$ -fazowy falownik napięcia złożony z  $M$ -połączonych równolegle półmostków tranzystorowych. Przy zasilaniu sinusoidalnym napięcia źródeł połączonych w gwiazdę opisuje poniższa zależność.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_k \\ \vdots \\ u_M \end{bmatrix} = U_m \begin{bmatrix} \sin(\varphi_s) \\ \sin(\varphi_s - m \frac{2\pi}{M}) \\ \sin(\varphi_s - 2m \frac{2\pi}{M}) \\ \vdots \\ \sin[\varphi_s - (k-1)m \frac{2\pi}{M}] \\ \vdots \\ \sin(\varphi_s - (M-1)m \frac{2\pi}{M}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$k=1,2,\dots,M$   
 $m=0,1,2,\dots,M-1$   
 $\varphi_s = 2\pi \int_0^t f_s(\tau) d\tau$

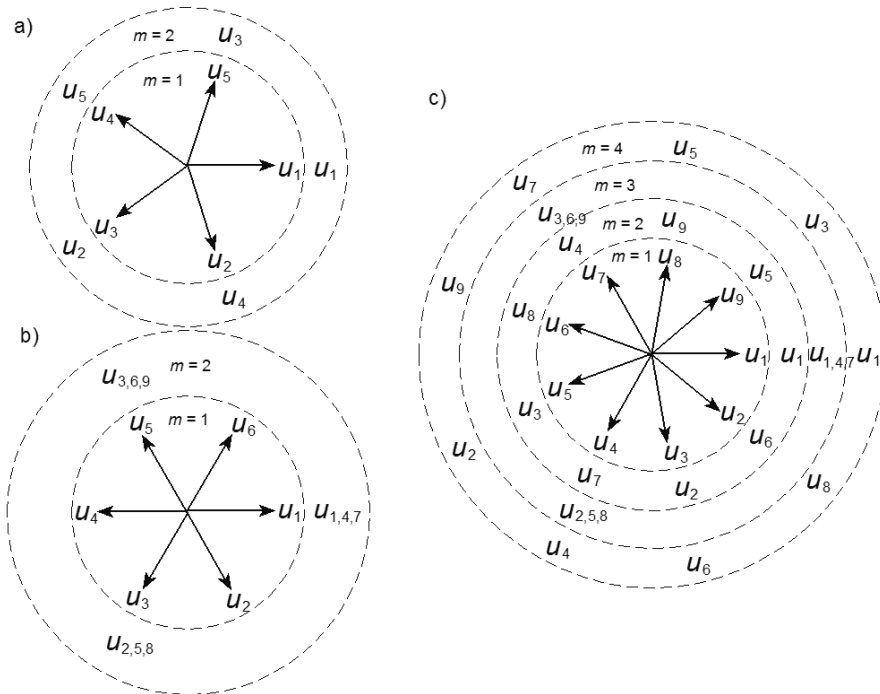
Liczba  $m$  określa tzw. numer następstwa faz lub kolejności zasilania. W zależności od niej można uzyskać  $M-1$  różnych układów napięć zasilających, przy czym pary liczb  $m = (1, M-1), (2, M-2), (3, M-3), \dots$  dają takie same układy wielofazowe, lecz o wzajemnie przeciwnym następstwie. Obrazem tych napięć są wykresy wskazowe dla  $f_s = \text{const}$  przedstawione na rys. 2.

Za pomocą zabiegów konstrukcyjnych, dokonywanych na uzwojeniu stojana, można uzyskać różne właściwości silników wielofazowych. Uzwojenia te charakteryzują się wspólną cechą: poprzez zmianę kolejności zasilania można uzyskać  $m_M$  prędkości idealnego biegu jałowego dla dodatniego lub ujemnego kierunku wirowania.

$$m_M = \frac{M-1}{2} \text{ dla nieparzystej liczby faz } M \quad (2)$$

$$m_M = \frac{M-2}{2} \text{ dla parzystej liczby faz } M \quad (3)$$

Na rys. 2 pokazano właśnie  $m_M$  układów wektorowych dla danej liczby faz. Układy przeciwnie mają odwrotne następstwo wskazów.



Rys. 2. Gwiazdy napięć układów wielofazowych dla poszczególnych kolejności zasilania  $m$  i liczby faz: a)  $M=5$ ; b)  $M=6$ ; c)  $M=9$

Fig. 2. The phasor stars of multiphase voltages for numbers of supply sequences  $m$  and number of phases: a)  $M=5$ ; b)  $M=6$ ; c)  $M=9$

Prędkość idealnego biegu jałowego dla kolejności  $m = m_{(+)} = 1, 2, \dots, m_M$  wynosi:

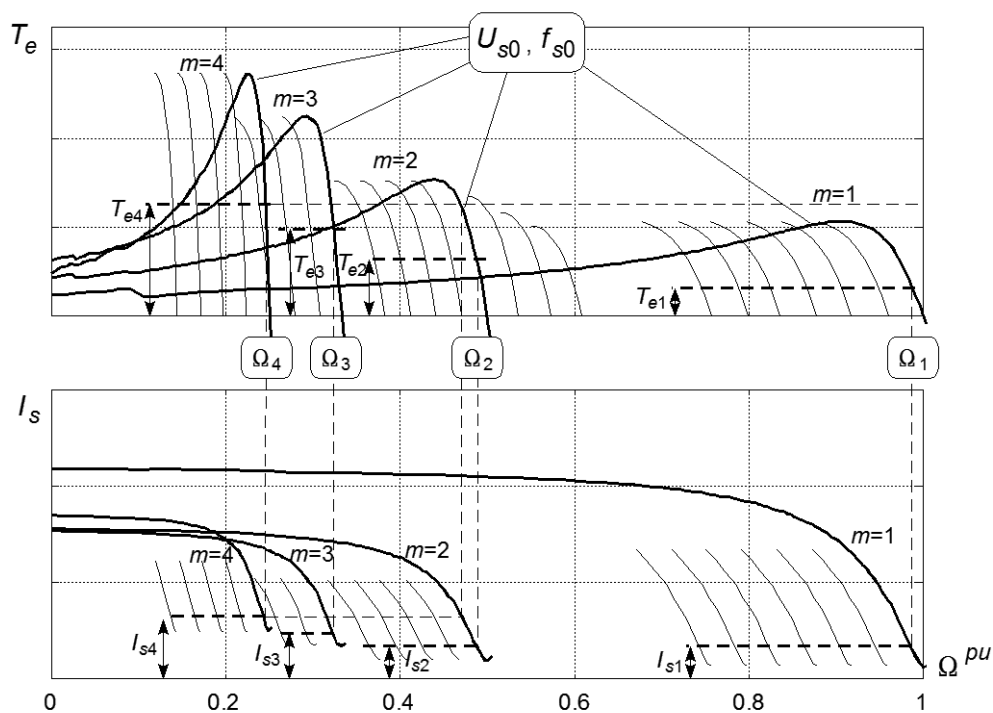
$$\Omega_{0(+)} = \frac{2\pi f_s}{p \cdot m_{(+)}} \quad (4)$$

Dla przeciwnych kolejności zasilania  $m_{(-)} = M - m = M - 1, M - 2, \dots, M - m_M$ :

$$\Omega_{0(-)} = \frac{2\pi f_s}{p \cdot (m_{(-)} - M)} \quad (5)$$

Z powyższych wzorów wynika, że zmiana kolejności zasilania zmienia liczbę par biegunów wytwarzanych przez pole magnetyczne stojana. Silniki wielofazowe zwykle buduje się o liczbie par biegunów  $p = 1$ . Jeżeli liczba faz  $M$  jest podzielna przez 3, to przy kolejności zasilania  $m = \frac{M}{3}$  układ zasilania uzwojenia stojana staje się 3-fazowy (rys. 2b i 2c).

W pracach [11, 16] sklasyfikowano uzwojenia stojana, wyróżniając dwa podstawowe typy. Do napędu pojazdów wydają się być najlepsze uzwojenia pierwszego typu, gdyż charakterystyki mechaniczne silnika przy różnych kolejnościach zasilania oraz przy tej samej częstotliwości  $f_{s0}$  i napięciu  $U_{s0}$  kształtują się w przybliżeniu na stałą moc (rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyki momentu i prądu silnika 9-fazowego przy różnych kolejnościach zasilania  $m$  i częstotliwościowym sterowaniu skalarnym

Fig. 3. The steady state characteristics of torque and stator current versus p.u. speed for the 9-phase motor at various supply sequences and frequency control

Zastosowanie przełączania kolejności jako przełożeń mechanicznej skrzyni przekładniowej wiąże się z możliwością wytwarzania przez silnik większego momentu obrotowego przy mniejszej prędkości. Dla charakterystyk przykładowego silnika 9-fazowego przyjęto wartości odniesienia prędkości, momentu i wartości skutecznej prądu ( $\Omega_1, T_{e1}, I_{s1}$ ) dla kolejności zasilania  $m = 1$ , a dla pozostałych kolejności przyjęto wartości odpowiadające mocy  $P_1 = T_{e1}\Omega_1$ :

- dla  $m = 2$  zachodzi  $\Omega_2 \approx \frac{1}{2}\Omega_1$ ,  $T_{e2} = 2T_{e1}$ ,
- dla  $m = 3$  zachodzi  $\Omega_3 \approx \frac{1}{3}\Omega_1 = \frac{2}{3}\Omega_2$ ,  $T_{e3} = 3T_{e1} = \frac{3}{2}T_{e2}$ ,
- dla  $m = 4$  zachodzi  $\Omega_4 \approx \frac{1}{4}\Omega_1 = \frac{3}{4}\Omega_3$ ,  $T_{e4} = 4T_{e1} = \frac{4}{3}T_{e3}$ .

Powyższe wartości określają jednocześnie przełożenia mechaniczne wynikające ze zmiany kolejności.

Charakterystyki narysowane cienką linią na rys. 3 są określone dla napięcia  $U_s < U_{s0}$  oraz częstotliwości  $f_s < f_{s0}$ , oprócz kolejności  $m = 3$ , dla której zaznaczono również charakterystyki przy częstotliwości  $f_s > f_{s0}$  i niezmiennego napięcia. Charakterystyki dla różnych częstotliwości wskazują na ideę regulacji poprzez zmianę częstotliwości i kolejności zasilania.

Obserwując wartości prądu stojana, widać, że przy kolejnościach zasilania  $m = 1$  i 2 prąd  $I_{s2} \approx I_{s1}$ . Dla  $m = 3$   $I_{s3} \approx 1,4I_{s2}$ , natomiast dla  $m = 4$   $I_{s4} \approx 1,3I_{s3}$ . Wynika stąd, że wzrost momentu elektromagnetycznego, przy wzroście numeru kolejności, nie odbywa się kosztem proporcjonalnego wzrostu prądu, lecz na skutek zwiększenia liczby par biegunów pola magnetycznego.

Przedstawione właściwości stanowią podstawę do skalarnej sterowania silników wielofazowych. Przy większych numerach kolejności zasilania można wymusić większy moment elektromagnetyczny, a przez to odpowiednio duży moment dynamiczny lub, w stanach ustalonych, zapewnić pracę przy większym momencie oporowym.

### 3. Napęd sterowany wektorowo

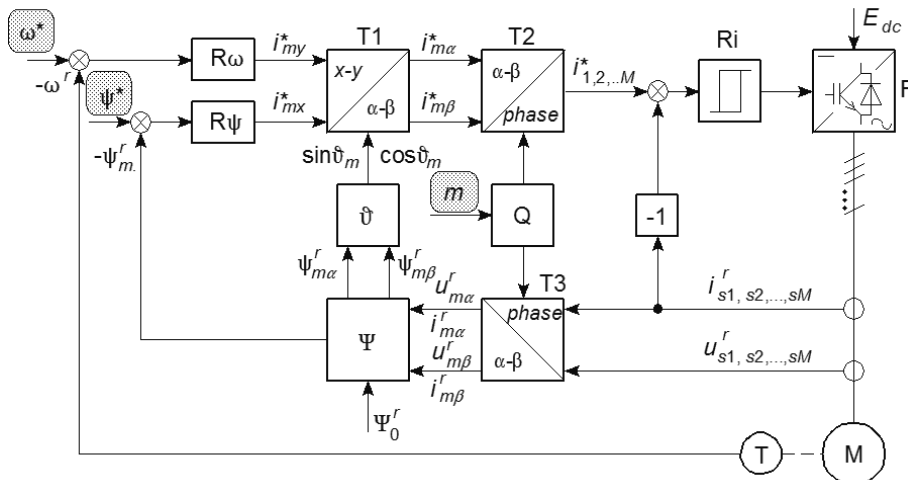
Sterowanie polowo zorientowane względem wektora strumienia skojarzonego z uzwojeniem wirnika [9, 14] opiera się na klasycznej metodzie opracowanej dla monoharmonicznego modelu matematycznego silnika indukcyjnego. W przypadku silników wielofazowych wykorzystuje się fakt, że przy kolejności zasilania  $m$  w szczeliny magnetycznej silnika dominuje harmoniczna pola o numerze  $v = mp$ . Różnica polega na uzupełnieniu sterowania o możliwość wykorzystania zmiany kolejności zasilania przy odpowiedniej konstrukcji uzwojeń stojana i wirnika, minimalizującej oddziaływanie pasożytnicze innych harmonicznych pola magnetycznego, zwłaszcza  $v_{(-)} = p(m-M)$  i  $v_{(+)} = p(m+M)$ .

Na rys. 4 przedstawiono strukturę układu sterowania wektorowego silnika wielofazowego. Moment elektromagnetyczny silnika dla danego numeru kolejności  $m = m_{(+)} = 1, 2, \dots, m_M$  jest regulowany zgodnie z zależnością:

$$T_e \approx T_{em} = 2 m p \frac{L_m}{L_{mr}} \psi_m i_{my} \approx 2 m p \psi_m i_{my} \quad (6)$$

stanowiącą składnik dominujący wyrażenia pełnego na moment (indeks dolny  $m$  wskazuje również na numer kolejności; zrezygnowano z indeksów  $s$  i  $r$  oznaczających tradycyjnie stojan i wirnik).

Podobnie jak dla silnika 3-fazowego, przy utrzymywaniu stałej wartości strumienia wirnika  $\psi_m = \psi^*$ , charakterystyki mechaniczne silnika stają się liniami prostymi i silnik nie wykazuje momentu krytycznego. Regulacji strumienia na stałą wartość dokonuje się poprzez zmianę współrzędnej  $i_{mx}$  wektora prądu stojana, a sterowanie momentu silnika odbywa się za pomocą współrzędnej  $i_{my}$  tego wektora prądu. Przy wymuszeniu pracy ze stałym strumieniem  $\psi^*$  i stałym prądem  $i_{my}^*$  dla każdej kolejności  $m = 1, 2, \dots, m_M$  moment silnika wzrasta wraz ze wzrostem tej liczby, a prędkość silnika proporcjonalnie maleje. Wskazuje to na mechanizm utrzymywania stałej mocy na wale, podobny do działania przekładni mechanicznej. W odróżnieniu od uzwojeń fazowych o rozpiętości cięciwowej (rys. 1), silnik z uzwojeniami średnicowymi takich właściwości nie wykazuje [14].



Rys. 4. Schemat strukturalny sterowania wektorowego połowo zorientowanego silnika wielofazowego

Fig. 4. Structural diagram of field oriented control for the mutiphase motor

Na przedstawionym schemacie „**R $\omega$** ” jest regulatorem prędkości, „**R $\psi$** ” regulatorem strumienia, **Ri** natomiast stanowi zespół histerezowych regulatorów prądów fazowych. Bloki „**T1**” i „**T2**” realizują transformację sygnałów wyjściowych regulatorów z układu współrzędnych prostokątnych x-y związanego z wektorem strumienia wirnika przy kolejności  $m$  do układu naturalnego związanego ze stojanem. W bloku „**Q**” wytwarzane są sygnały  $Q_k = 1$  dla  $k = m$  oraz  $Q_k = 0$  dla  $k \neq m$  ( $k = 1, 2, \dots, m_M$ ). Sygnały te stanowią o wyborze współrzędnych wektorów mających decydujące znaczenie przy danej kolejności zasilania. Wynika to z faktu, że pełna transformacja z układu fazowego do  $\alpha$ - $\beta$  prądów i napięć niesinusoidalnych powoduje, że wszystkie współrzędne wektorów po transformacji są nielinearne. Największe wartości i największe znaczenie mają współrzędne odpowiadające harmonicznej  $v = mp$ . Tak więc współczynniki  $Q_k$  modyfikują wektory napięcia i prądu po

transformacji, zerując współrzędne nieistotne. W bloku „ $v$ ” wyznaczone są funkcje trygonometryczne  $\sin$  i  $\cos$  kąta  $v_m$ , położenia wektora strumienia wirnika, konieczne do transformacji ortogonalnej w bloku „ $T1$ ”. Pozostałe elementy pełnią taką samą rolę jak w klasycznym układzie sterowania.

W przedstawionym układzie prądy fazowe stojana są wymuszane za pomocą falownika napięcia „ $F$ ” pracującego jako źródło prądowe sterowane regulatorami histerezowymi. Rzecz jasna, można sformułować układ sterujący wymuszający napięcia stojana, będzie on jednak o wiele bardziej skomplikowany niż dla silnika 3-fazowego ze względu na konieczność odsprężnienia torów sterowania momentu i strumienia przy danej kolejności zasilania.

W celu zilustrowania sterowania wektorowego na rys. 5 przedstawiono przykładowe przebiegi dla silnika 9-fazowego, uzyskane obliczeniowo przy różnych kolejnościach zasilania i niemal tym samym strumieniu wirnika  $\psi_m$  (różnice wynikły z nieco odmiennego oddziaływania silnika dla każdej kolejności). Pokazano przebiegi prędkości, momentu elektromagnetycznego, prądu i napięcia pierwszej fazy oraz strumienia wirnika (przy kolejnościach  $m = 3$  i  $4$  przebieg strumienia był podobny jak przy  $m = 1$  i  $2$ , stąd nie został on pokazany).

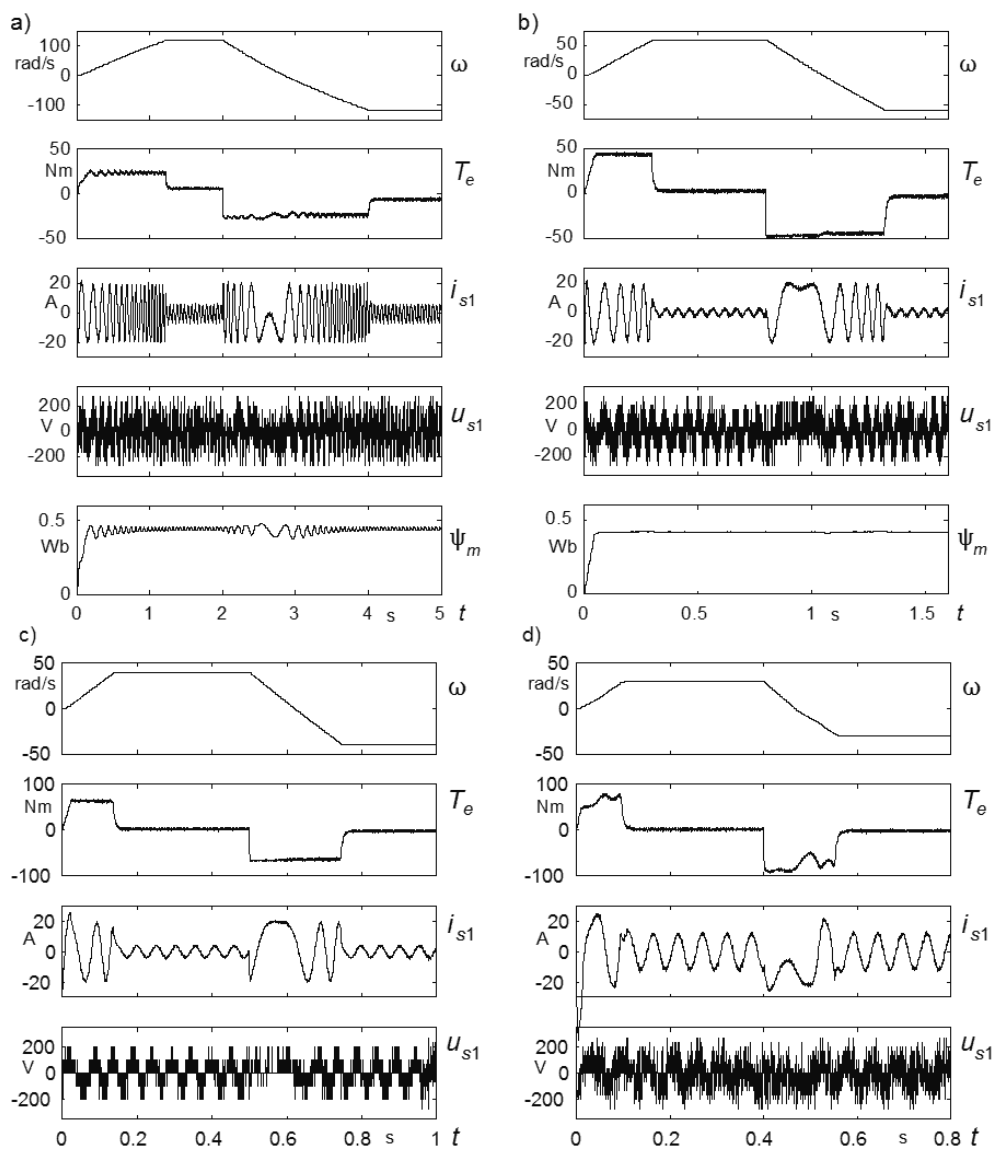
Silnik wytwarza około  $m$ -krotnie większy moment niż przy kolejności  $m = 1$  podczas pracy dla  $m > 1$ . W przejściowych stanach dynamicznych prąd stojana jest na niemal takim samym poziomie dla wszystkich  $m$ . Najgorszy jest przypadek pracy przy  $m = 4$  z uwagi na duży prąd jałowy. W praktyce praca przy tej kolejności byłaby krótkotrwała, traktowana podobnie do jazdy samochodu na pierwszym biegu. Korzystna w tym przypadku jest jedynie przeciążalność momentem oraz słabe nasycenie obwodu magnetycznego ze względu na dużą sumaryczną szczelinę powietrzną przy większej liczbie par biegunów wypadkowego pola magnetycznego.

Pomimo iż struktura układu sterującego opiera się na modelu uproszczonym silnika, uwzględniającym jedynie dominującą harmoniczną pola dla kolejności zasilania  $m$ , w rzeczywistości oddziaływania pasożytnicze innych harmonicznych są mało istotne, a prawo sterowania momentu wynikające z formuły (6) okazało się poprawne. Przedstawione przebiegi ukazują, że efekt niemal  $m$ -krotnego zwiększania momentu i  $m$ -krotnego zmniejszenia prędkości przy niemal takim samym prądzie i napięciu stojana upoważnia do stwierdzenia, iż silnik indukcyjny wielofazowy może być wykorzystany, przy wszystkich różnicach, podobnie jak silnik standardowy z wielostopniową przekładnią mechaniczną, patrząc od strony wyjścia przekładni, zarówno przy pracy silnikowej, jak i prądnicowej.

#### 4. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wielofazowy silnik indukcyjny klatkowy może pracować w pewnym zakresie podobnie jak silnik 3-fazowy z mechaniczną skrzynią przekładniową. Przełączanie „biegów” następuje w przypadku silnika wielofazowego na drodze sterowania układu przekształtnikowego. Tak skonstruowany napęd nie wymaga przekształtnika obliczonego na maksymalny moment uzyskiwany przy dużym prądzie w celu wykorzystania pełnych możliwości napędu. Praca napędu przy mniejszych prądach jest wyjątkowo korzystna w napędzie samochodów elektrycznych, zwłaszcza podczas jazdy z małymi prędkościami, przy dużych przyspieszeniach podczas ruszania oraz w warunkach jazdy terenowej.





Rys. 5. Ilustracja działania napędu z silnikiem 9-fazowym sterowanym wektorowo podczas rozruchu i nawrotu przy kolejnościach zasilania: a)  $m = 1$ ; b)  $m = 2$ ; c)  $m = 3$ ; d)  $m = 4$

Fig. 5. The illustration for the field oriented control of the 9-phase motor operating at starting and reverse for the supply sequence: a)  $m = 1$ ; b)  $m = 2$ ; c)  $m = 3$ ; d)  $m = 4$

Najistotniejsza różnica pomiędzy silnikiem standardowym pracującym z przekładnią mechaniczną a silnikiem wielofazowym przejawia się w tym, że przy wzroście numeru kolejności  $m$ , a tym samym wzroście liczby par biegunów pola, wzrasta prąd magnesujący silnika wielofazowego, którym, przy sterowaniu wektorowym, jest współrzędna  $i_{mx}$  wektora prądu stojana. Zatem wytworzenie strumienia wirnika o takiej samej wartości jak przy mniejszych numerach kolejności  $m$  będzie wymagało w przybliżeniu  $m$ -krotnego zwiększenia tej współrzędnej w stosunku do pracy przy  $m = 1$  i tym samym napięciu i częstotliwości. Tak więc przy pracy silnika nieobciążonego prąd stojana będzie wzrastał przy wzroście  $m$ , ale przy wytwarzaniu odpowiednio dużego momentu elektromagnetycznego, odpowiadającego granicznemu prądowi stojana (np. znamionowemu), udział tej współrzędnej w module prądu  $i_m = \sqrt{i_{mx}^2 + i_{my}^2}$  będzie niewielki, co uwidoczniło na rys. 5 w przebiegu prądu fazowego  $i_{s1}$  dla kolejności  $m = 1, 2, 3$ . Przy kolejności  $m = 4$  wpływ prądu jałowego jest już jednak znaczący, a dodatkowo dla przedstawionego silnika kształt pola magnetycznego wytwarzanego przez stojan był znacznie gorszy niż przy pozostałych kolejnościach zasilania.

Jak wynika z przedstawionych rozważań, decyzja o wyborze silnika wielofazowego zamiast silnika standardowego z przekładnią mechaniczną jest kompromisem. Zastosowanie przekładni mechanicznej, przy pominięciu jej strat, zapewnia takie same warunki pracy silnika na wejściu i wyjściu przy różnych przełożeniach. W silniku wielofazowym występuje jedynie efekt przekładni przy różnych kolejnościach zasilania, stwarzając możliwość wywarzania większego momentu obrotowego przy tej samej częstotliwości i niemal takim samym prądzie i napięciu. Silniki te mają jednak dodatkowe zalety:

- zastosowanie falownika obliczonego na mniejsze prądy, pracującego przy stosunkowo dużych współczynnikach głębokości modulacji (nie mniejszych niż 0,45) niemal w całym zakresie regulacji prędkości,
- możliwość pracy napędu z przerwanyimi fazami, np. zjazd awaryjny pojazdu trakcyjnego [7, 14] lub dalsza praca w celu podtrzymania procesu technologicznego,
- możliwość zbudowania napędu dla pojazdów dwusystemowych, np. poruszających się po szlakach tramwajowych i kolejowych [16].

Konsekwencją kompromisu przy wyborze napędu z silnikiem wielofazowym jest dobór przełożeń wynikających z kolejności zasilania. Na przykład przełączenie z kolejności  $m = 1$  na  $m = 2$  może się okazać zbyt dużym (dwukrotnym) skokiem prędkości idealnego biegu jałowego. W tym przypadku istnieje możliwość takiego zaprojektowania uzwojenia stojana, aby uzyskać najlepszą pracę silnika przy pozostałych kolejnościach zasilania i pominięciu możliwości pracy przy  $m = 1$ , dla której zaprojektowane uzwojenie nie byłoby wówczas optymalne. Istnieją jeszcze inne możliwości kształtowania uzwojenia wielofazowego, a przez to właściwości silnika, gdyż przedstawione w pracy wyniki dotyczą jedynie ich jednego rodzaju, opartego na konfiguracjach znanych z silników standardowych. Jest to jedno z wielu wyzwań, jakie stoją jeszcze przed wielofazowymi silnikami indukcyjnymi.

## Literatura

- [1] Sobczyk T.J., *Theorie der Mehrphasen-Induktionsmotoren fuer mehrere Drehzahlen*, Int. Wissenschaftlich – Technische Taung, Dresden 1988, 121-124.

- [2] Sobczyk T.J., *Speed control of multiphase induction motors*, 34 Int. Wiss. Koll. TH Ilmenau 1989, 145-148.
- [3] Drozdowski P., *Silnik indukcyjny dziewięciofazowy zasilany z falownika napięcia*, V Symp. Podstawowe Problemy Energoelektroniki PPE'93, Gliwice 1993, 212-219.
- [4] Drozdowski P., *Equivalent circuit and performance characteristics of a 9-phase cage induction motor*, Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'94, Vol. 1, Paris 1994, 118-123.
- [5] Drozdowski P., *Some circumstances for an application of the 9-phase induction motor in the traction drive*, Second Int. Conf. "Modern Supply Systems and Drives for Electric Traction", Warsaw Oct. 1995, 53-56.
- [6] Drozdowski P., *Charakterystyki statyczne dziewięciofazowego testowego silnika indukcyjnego zasilanego z falownika*, VII Konf. Nauk. Trakcji Elektr. SEMTRAK'96, Kraków-Zakopane 1996, 23-28.
- [7] Drozdowski P., *Niektóre własności dziewięciofazowego silnika indukcyjnego klatkowego podczas pracy symetrycznej i niesymetrycznej*, Czasopismo Techniczne z. 7-E, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996, 45-62.
- [8] Zhao Y., Lipo T.A., *Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance*, IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 11, No. 3, Sept. 1996, 570-584.
- [9] Drozdowski P., *Field oriented control of a 9-phase cage induction motor*, Czasopismo Techniczne Z.4-E/1998, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998, 1-25.
- [10] Toliyad H.A., *Analysis and simulation of five-phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connection*, IEEE Trans. on Power Electron, Vol. 13, No. 4, 1998, 748-755.
- [11] Drozdowski P., *Synthesis elements of polyphase windings for cage induction motors*, Archives of Electrical Engineering, Vol. XLVIII, No 1-2/1999, 63-68.
- [12] Teodorescu R., Tataru A.M., Lungeanu F., Dumitru T., Iov F., *Simulation of five-phase induction motor*, Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Symp. „Electromotion '99”, Paper A-13, Vol. 1, Patras 1999, 93-96.
- [13] Drozdowski P., *A 9-phase cage induction motor fed by a 3×9 matrix converter*, Proc. Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000, Vol. 1, Espoo 2000, 387-391.
- [14] Drozdowski P., *Kształtowanie charakterystyk i własności ruchowych wielofazowych silników indukcyjnych klatkowych*, Monografia 278, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000.
- [15] Levi E., Iqbal A., Vucosavic S.N., Toliyad H.A., *Modeling and control of a five-phase series-connected two-motor drive*, Industrial Electronics Society, 2003, IECON'03, The 29<sup>th</sup> Ann. Conf. of the IEEE, Vol. 1, Nov. 2003, 208-213.
- [16] Drozdowski P., *Układ zasilania dziewięciofazowego silnika indukcyjnego w trakcji elektrycznej*, Mat. konf. „X Jub. Ogólnopolska Konf. Nauk. Trakcji Elektrycznej” SEMTRAK 2004, tom I, Zakopane-Kościełisko 2004.
- [17] Shuai Lu., Corzine K., *Direct torque control of five-phase induction motor using space vector modulation with harmonics elimination and optimal switching sequence*, Applied Power Electr. Conf. and Exposition, 2006, APEC'06, 21 Annual IEEE, March 2006.

- [18] Pereira L.A., Scharlau C.C., Pereira L.F.A., Haffner J.F., *General model of a five-phase induction machine allowing for harmonics in the air gap field*, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, Issue 4, Dec 2006, 891-899.
- [19] Levi E., Jones M., Iqbal A., Vukosavic S.N., Toliyat H.A., *Induction Machine/Syn-Rel Two-Motor Five-Phase Series-Connected Drive*, IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 22, Issue 2, June 2007, 281-289.