

Michał JANASZEK  
Kamil KWIATKOWSKI

## NAPĘD POJAZDU TURYSTYCZNEGO OSOBOWO-TOWAROWEGO

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono koncepcję układu napędowego pojazdu turystycznego osobowo-towarowego o masie całkowitej do jednej tony. Napęd składa się z dwóch przekształtników tranzystorowych sterowanych przez jeden układ regulacyjny, oraz dwóch silników zamontowanych w kołach napędowych pojazdu. W napędzie zastosowano silniki synchroniczne z magnesami trwałymi i o budowie odwróconej, tzn. z wirnikiem zewnętrznym połączonym bezpośrednio z felgą koła. Omówiona została metoda sterowania jednym programem sterującym dwoma silnikami zasilanymi z dwóch falowników. Zaprezentowane zostały wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych układu.*

**Słowa kluczowe:** *pojazdy elektryczne, napęd elektryczny, silniki z magnesami trwałymi*

### 1. WSTĘP

---

Występujący w ostatnich latach wzrost cen paliw spowodował zainteresowanie wykorzystaniem napędów elektrycznych w pojazdach przeznaczonych do celów turystycznych, do przewozu ludzi i towarów. Przewiduje się, że pojazdy o napędzie elektrycznym stosowane będą tam, gdzie użycie pojazdów spalinowych jest zabronione lub niewskazane. Najczęściej wymienia się obszary chronione pod względem ekologicznym, np.: centra zabytkowych miast, wydzielone obszary miast o ograniczonym ruchu drogowym, parki narodowe, tereny rekreacyjne, pola golfowe.

Przewiduje się również zastosowanie pojazdów na terenach przemysłowych, np. jako środków transportu wewnątrzzakładowego, transportu towarów w halach

---

**dr inż. Michał JANASZEK**

e-mail: m.janaszek@iel.waw.pl

**mgr inż. Kamil KWIATKOWSKI**

e-mail: k.kwiatkowski@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 262, 2013

i pomieszczeniach zamkniętych, transportu pasażerów i bagaży na lotniskach oraz jako pojazdów specjalnych, remontowych, do oczyszczania terenu, sanitarnych. Jako maszyny i pojazdy robocze mogą być wykorzystywane mini wywrotki do przewozu materiałów sypkich, w budownictwie, rolnictwie i hodowli zwierząt, maszyny do prac w ogrodach, szklarniach, itp.

Przewidywane zastosowanie pojazdów o napędzie elektrycznym jest szerokie i różnorodne. Spowodowane jest to ich zaletami w stosunku do napędów spalinowych. W literaturze podkreśla się najważniejsze cechy pojazdów o napędzie elektrycznym i ich korzystny wpływ na stan środowiska naturalnego: brak wydzielania spalin w miejscu eksploatacji pojazdu, wyższą sprawność energetyczną, możliwość odzysku energii hamowania, mniejsze koszty energii i eksploatacji, bezpieczny magazyn energii, niską emisję hałasu, łatwą obsługę pojazdu, stosunkowo prostą obsługę serwisową, niezależnienie od rynku ropy.

## 2. POJAZD TURYSTYCZNY OSOBOWO-TOWAROWY

Instytut Elektrotechniki podjął się opracowania nowoczesnego, lekkiego pojazdu o napędzie elektrycznym, przewidzianego do przewozu pasażerów i towarów na odległość do 50 km. Masa całkowita pojazdu nie powinna przekraczać 1 tony. We wstępnych założeniach budowy pojazdu przyjęto, że pojazd będzie osiągał parametry techniczne pokazane w tabeli 1.

**TABELA 1**

Planowane parametry techniczne pojazdu

Parametry	Wartości parametrów planowane do uzyskania
Masa całkowita	do 1 tony
Masa pojazdu	do 700 kg
Obciążalność całkowita	do 300 kg,
Prędkość maksymalna	20 km/h
Pokonywanie wzniesień	do 20%
Przyspieszenie maksymalne	$a = 2 \frac{m}{s^2}$
Zasięg	do 50 km
Wymiary	długość 2,6 m; szerokość 1,2 m; wysokość 1,7 m
Magazyn energii	akumulatory 8 x 12 V = 96 V
Moc napędu elektrycznego	2 x 2000 W

Podstawowym celem jest opracowanie i zastosowanie w projektowanym pojeździe nowych rozwiązań układów elektrycznych:

- napędu z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych;
- mikroprocesorowego regulatora prędkości;

- kontrolera pokładowego, realizującego sterowanie nadrzędne pojazdu, programowanie, diagnostykę i monitorowanie pracy pojazdu;
- sterowania magistralą CAN;
- akumulatorowego magazynu energii;
- bezstykowego układu ładowania magazynu energii;
- energooszczędnego diodowego oświetlenia pojazdu.

Konstrukcja pojazdu składa się z dwóch podstawowych elementów:

- podwozia, do którego mocowane są wszystkie podzespoły napędowe, koła, układ kierowania pojazdem, układ hamowania mechanicznego, układ zawieszenia pojazdu, przekształtniki energoelektroniczne, układ sterowania, akumulatory, bezstykowy układ ładowania, oraz przetwornica zasilająca oświetlenie;
- nadwozia, w skład którego wchodzi siedzenia dla 4 osób, osłona przednia pojazdu i dach.



**Rys. 1. Model eksperymentalny pojazdu uniwersalnego o napędzie elektrycznym**

Kołami napędowymi pojazdu są koła tylne. Są w nich wbudowane silniki synchroniczne o magnesach trwałych i o budowie odwróconej. Są to silniki wolnoobrotowe, wysokomomentowe bez przekładni mechanicznej.

Kołami skrętnymi są koła przednie. Z nimi powiązany jest mechanizm kierowania pojazdem. Umieszczone są w nich hamulce hydrauliczne i hamulec ręczny.

Założono, że podwozie będzie podstawowym elementem mechanicznym, niezmiennym, wykorzystywanym w różnych wersjach pojazdu. Na podwoziu zamontowane będą urządzenia elektryczne pojazdu: koła napędowe, przekształtniki energoelektroniczne, układ sterowania, akumulatory, bezstykowy układ ładowania oraz przetwornica zasilająca oświetlenie.

W rezultacie wykonano eksperymentalny model pojazdu uniwersalnego (rys. 1).

### 3. UKŁAD NAPĘDOWY POJAZDU

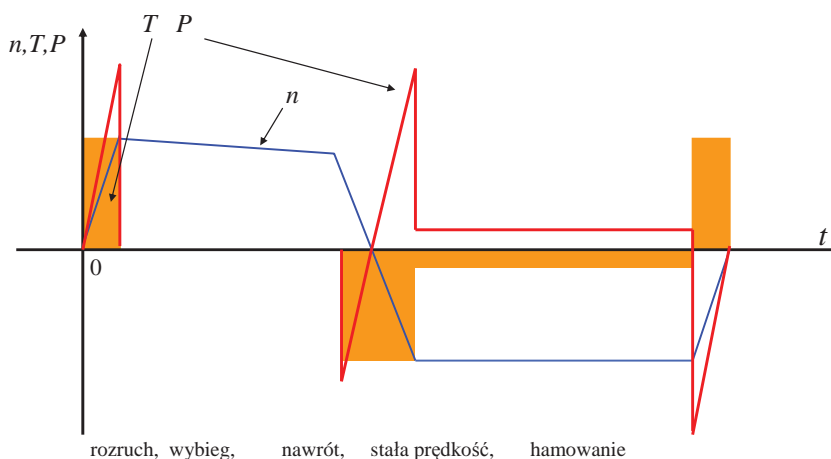
Charakterystyczne cechy napędów elektrycznych zależne są od parametrów technicznych pojazdów, dla których są przeznaczone. Przede wszystkim, pojazd jako obiekt napędzany ma dużą masę, co oznacza duży moment bezwładności sprowadzony do wału silnika napędzającego. Ponadto masa ta zmienia się w dużym zakresie, co utrudnia regulację napędu w pętli sprzężenia prędkościowego. Konieczna jest również możliwość regulacji momentu napędowego niezależnie od prędkości. Należy więc stosować pracę w pętli regulacji momentu, gdy prędkość jazdy oraz przyspieszenie ustalone są przez kierującego pojazdem.

Dalej układ regulacji napędu powinien zapewniać:

- pracę w czterech ćwiartkach układu współrzędnych moment-prędkość obrotowa;
- pracę przerywaną w funkcji czasu – obciążenie w czasie rozruchu i hamowania;
- hamowanie z oddawaniem energii do akumulatora;
- niski poziom hałasu, co uzależnione jest od częstotliwości impulsów PWM napięcia zasilającego silnik.

Przebieg typowego cyklu pracy napędu można podzielić na [1] (rys. 2):

- rozruch do prędkości ustalonej najczęściej ze stałym zadaniem momentem napędowym – napęd pracuje silnikowo, moc napędu dodatnia;
- jazda ze stałą prędkością – praca silnikowa z niewielkim momentem;
- wybieg – praca bez momentu ze zmniejszającą się prędkością;
- hamowanie od prędkości ustalonej ze stałym zadaniem momentem hamującym – napęd pracuje generatorowo, moc napędu ujemna;
- nawrót – początkowy okres to hamowanie generatorowe (moc ujemna), końcowy okres to rozruch do ustalonej prędkości (praca silnikowa, moc dodatnia).



**Rys. 2. Praca napędu trakcyjnego w funkcji czasu:**

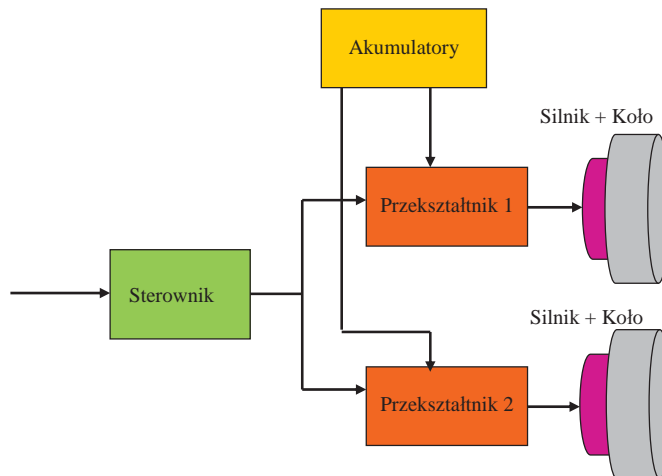
$n$  – prędkość;  $T$  – moment napędowy;  $P$  – moc

Prace nad napędem pojazdu prowadzone były w dwóch zakładach Instytutu Elektrotechniki: W Zakładzie Maszyn Elektrycznych zaprojektowane i wykonane zostały silniki synchroniczne o magnesach trwałych. W Zakładzie Napędów Elektrycznych opracowana została metoda sterowania napędami, zaprojektowano i wykonano falowniki i układ procesorowy sterowania. Silniki prądu przemiennego synchroniczne lub bezszczotkowe wymagają synchronizacji napięcia względem strumienia, co wymusza konieczność stosowania układu „jeden przekształtnik – jeden silnik”. Mogą być stosowane w topologiach z rozdzielonymi napędami kół lub jako napęd jednosilnikowy z mechanicznym mechanizmem różnicowym. Jednocześnie są to silniki o najwyższej sprawności i dużej gęstości mocy – dużym współczynnikiem moc/ciążar.

Tradycyjne silniki synchroniczne posiadają zewnętrzny stojan, w którym umieszczone są uzwojenia trzech faz. Wirnik o magnesach trwałych umieszczony jest wewnątrz. Najczęściej są to silniki szybkoobrotowe i napędzają koła pojazdu za pośrednictwem przekładni mechanicznej.

W celu eliminacji przekładni mechanicznej oraz bezpośredniego połączenia silnika z kołem napędowym pojazdu, opracowano silnik o budowie odwróconej. Stojan z uzwojeniami faz umieszczony jest wewnątrz wirnika, a wirnik o magnesach trwałych połączony jest bezpośrednio z kołem.

W rezultacie powstała nowa topologia napędu (rys. 3).



**Rys. 3. Topologia według koncepcji napędu bezpośredniego z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych i budowie odwróconej**

Wybrana topologia napędu bezpośredniego zawiera:

- dwa silniki synchroniczne o magnesach trwałych i o budowie odwróconej, wbudowane w koła napędowe pojazdu (rys. 4, 5, 6, 7). Silniki wyposażone są w czujniki optoelektryczne odbiciowe, określające położenie wirnika względem stojana i pozwalające synchronizować napięcie zasilające fazy silnika względem wirnika. Ponieważ magnesy połączone są trwale z wirnikiem, syn-

chronizacja względem wirnika jest jednocześnie synchronizacją względem strumienia silnika;

- dwa przekształtniki trójfazowe, zasilające silniki w układzie „jeden przekształtnik – jeden silnik”;
- jeden sterownik procesorowy z procesorem TMS320F2812 produkcji Texas Instruments. Napęd sterowany jest za pomocą jednego programu sterującego;
- baterię 8 akumulatorów 12-woltowych o pojemności 90 Ah, czyli o napięciu znamionowym 96 V i energii ok. 31 MJ.



**Rys. 4. Kompletny silnik** (widok od strony mocowania koła pojazdu)



**Rys. 5. Kompletny silnik** (widok od strony mocowania do podwozia pojazdu)



**Rys. 6. Silnik z felgą i oponą zamontowany na ramie pojazdu** (widok od strony mocowania koła pojazdu)



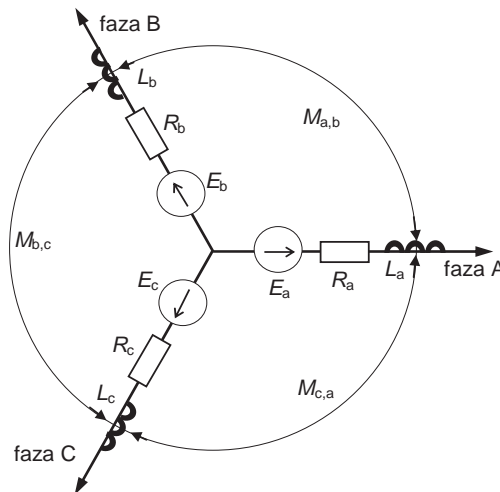
**Rys. 7. Silnik z felgą i oponą zamontowany na ramie pojazdu** (widok od strony mocowania do podwozia pojazdu)

Zastosowany układ napędowy pozwala też na zwrot energii podczas hamowania. Energia kinetyczna pojazdu podczas hamowania generatorowego przekształcana jest w energię elektryczną zwracaną do źródła. Wprowadzenie takiego mechanizmu

pozwała na oszczędzenie energii elektrycznej, a co za tym idzie, wydłuża czas pracy i zasięg pojazdu. Sekwencja przełączeń zsynchronizowana jest z aktualnym położeniem silnika za pomocą sygnałów wysyłanych przez wbudowany w maszynę czujnik położenia. Czujnik ten składa się dwóch podstawowych elementów: układu trzech fototranzystorów zamontowanych na stojanie oraz układu luster wirujących wraz z wirnikiem.

#### 4. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O MAGNESACH TRWAŁYCH

Zastosowany w napędzie pojazdu silnik synchroniczny o budowie odwróconej posiada magnesy zamontowane na wewnętrznej powierzchni wirnika. Można go zatem opisać równaniami stanu tak, jak opisuje się klasyczny silnik o magnesach trwałych zamontowanych na powierzchni wirnika (ang. *Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor*).



Rys. 8. Schemat silnika synchronicznego o magnesach trwałych

Model matematyczny silnika synchronicznego został opisany z przyjęciem założeń, które w pełni odpowiadają parametrom rzeczywistym (rys. 8) [2]:

- zastosowany jest silnik synchroniczny o magnesach trwałych;
- silnik jest trójfazowy (fazy **a**, **b**, **c**, przesunięte o kąt  $\frac{2}{3}\pi$  radianów) z uzwojeniem połączonym w gwiazdę, mający 6 par biegunów;
- silnik ma sinusoidalny rozkład strumienia magnetycznego oraz sinusoidalny przebieg sił elektromotorycznych w fazach przy stałej prędkości kątowej;

- silnik jest symetryczny, tzn.:
  - indukcyjności własne faz silnika  $L_a = L_b = L_c = L$ ,
  - indukcyjności wzajemne faz silnika  $M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} = M$ ,
  - indukcyjność silnika  $L_d = L_q = \frac{1}{2}L$ ,
  - rezystancje faz  $R_a = R_b = R_c = R$ ;
- parametry silnika są stałe, niezależne od czasu, obciążenia i prędkości kątowej;
- obwód magnetyczny silnika synchronicznego jest liniowy;
- pominięty zostanie wpływ anizotropii, nasycenia magnetycznego zjawiska histerezy i prądów wirowych.

Przy wykorzystaniu zapisu wektorowego, dynamikę silnika synchronicznego opisują macierzowe równania różniczkowe (równania stanu):

równanie napięć:

$$\frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi} = -\mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{u} \quad (1)$$

równanie momentów:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (\boldsymbol{\Psi} \times \mathbf{i}) - \frac{k_t}{J} \omega + \frac{1}{J} T_o \quad (2)$$

gdzie:

- $\boldsymbol{\Psi}$  – wektor strumienia;
- $\mathbf{i}$  – wektor prądu;
- $\mathbf{u}$  – wektor napięcia;
- $\mathbf{R}$  – macierz rezystancji;
- $k_t$  – współczynnik tarcia;
- $T_o$  – moment obciążenia;
- $\omega$  – prędkość kątowa;
- $J$  – moment bezwładności.

Poszczególne wielkości fizyczne, tzn. prąd, napięcie, strumień magnetyczny skojarzony z uzwojeniem stojana, określane są jako wektory przestrzenne, położone na płaszczyźnie prostopadłej do osi silnika. Chwilowa wielkość i położenie wektora  $\mathbf{X}$  opisane są przez wartości chwilowe danej wielkości fizycznej w fazach A, B, C.

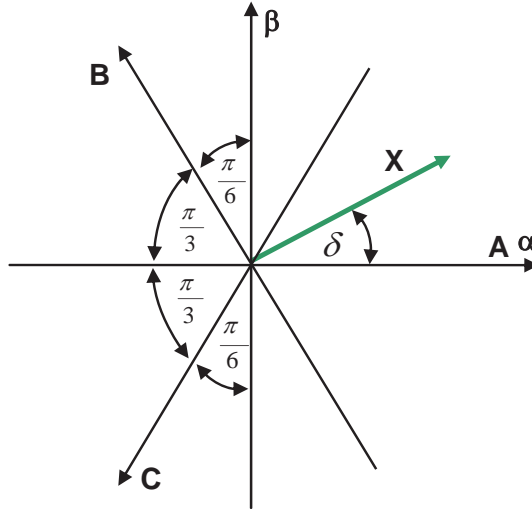
$$\mathbf{X}_{ABC} = \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} = |\mathbf{X}(t)| \cdot \begin{bmatrix} \cos(p\omega(t)t + \delta(t)) \\ \cos(p\omega(t)t + \delta(t) + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(p\omega(t)t + \delta(t) + \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Amplituda  $|\mathbf{X}(t)|$ , pulsacja  $\omega(t)$  oraz faza  $\delta(t)$  wektora są funkcjami czasu i mogą określać przebiegi czasowe niesinusoidalne. Jedyne warunki, jakie musi być spełnione, aby można było określić wektor przestrzenny, to aby suma wartości chwilowych w poszczególnych fazach była równa zeru:

$$x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) = 0 \quad (4)$$



Dla uproszczenia obliczeń stosuje się zapis wektorowy w stacjonarnym układzie współrzędnych prostokątnych  $\alpha\beta$  (rys. 9). Dla przekształcenia równań z układu trójfazowego  $ABC$  do układu ortogonalnego  $\alpha\beta$  najczęściej stosowane jest przekształcenie Clarke'a.



**Rys. 9. Przekształcenie wektorów z układu trójfazowego  $ABC$  do ortogonalnego  $\alpha\beta$**

Składową  $x_\alpha$  zapisujemy wzorem:

$$x_\alpha = x_a - x_b \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - x_c \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (5)$$

Uwzględniając, że

$$\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} \quad (6)$$

oraz

$$x_c(t) = -x_a(t) - x_b(t) \quad (7)$$

po przekształceniach otrzymujemy:

$$x_\alpha = \frac{3}{2} x_a \quad (8)$$

Składową  $x_\beta$  zapisujemy wzorem:

$$x_\beta = x_b \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - x_c \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (9)$$

Uwzględniając, że

$$\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (10)$$

otrzymujemy:

$$x_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(x_b - x_c) \quad (11)$$

Przeskalowując przez  $\frac{2}{3}$ , otrzymujemy składowe wektora we współrzędnych ortogonalnych:

$$\mathbf{X}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(x_b - x_c) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Ponieważ w układach napędowych wygodnie jest mierzyć tylko dwie składowe wektora, np.  $x_a(t)$ ,  $x_b(t)$ , używany jest algorytm przekształcenia Clarke'a:

$$\mathbf{X}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(x_a + 2 \cdot x_b) \end{bmatrix} \quad (13)$$

lub w zapisie funkcji czasu:

$$\mathbf{X}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = |\mathbf{X}(t)| \cdot \begin{bmatrix} \cos(p\omega(t)t + \delta(t)) \\ \sin(p\omega(t)t + \delta(t)) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Po przekształceniu wektorów napięcia, prądu i strumienia zgodnie z algorytmem Clarke'a, otrzymujemy składowe ortogonalne:

wektora napięcia:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(u_a + 2 \cdot u_b) \end{bmatrix} = |\mathbf{u}| \begin{bmatrix} \cos(p\omega t + \mu) \\ \sin(p\omega t + \mu) \end{bmatrix} \quad (15)$$

wektora prądu:

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + 2 \cdot i_b) \end{bmatrix} = |\mathbf{i}| \begin{bmatrix} \cos(p\omega t + \delta) \\ \sin(p\omega t + \delta) \end{bmatrix} \quad (16)$$

wektora strumienia:

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(\psi_a + 2 \cdot \psi_b) \end{bmatrix} = |\boldsymbol{\psi}| \begin{bmatrix} \cos(p\omega t + \lambda) \\ \sin(p\omega t + \lambda) \end{bmatrix} \quad (17)$$

W silniku synchronicznym o magnesach trwałych strumień wypadkowy można rozłożyć na dwie składowe ortogonalne:

1. składowa strumienia samoindukcji

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} \psi_{i\alpha} \\ \psi_{i\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = |i| \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(p\omega t + \delta) \\ \sin(p\omega t + \delta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

2. składowa strumienia od magnesów trwałych

$$\Psi_f = \begin{bmatrix} \psi_{f\alpha} \\ \psi_{f\beta} \end{bmatrix} = |\Psi_f| \begin{bmatrix} \cos(p\omega t + \lambda) \\ \sin(p\omega t + \lambda) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Strumień wypadkowy silnika jest sumą geometryczną tych dwóch składowych

$$\Psi = \Psi_i + \Psi_f = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{f\alpha} \\ \psi_{f\beta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

W silniku synchronicznym o magnesach trwałych indukowana jest siła elektromotoryczna proporcjonalna pochodnej strumienia

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt} \Psi_i + \frac{d}{dt} \Psi_f = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} + p\omega \begin{bmatrix} -\psi_{f\beta} \\ \psi_{f\alpha} \end{bmatrix} \quad (21)$$

co pozwala zapisać równania napięć silnika we współrzędnych ortogonalnych:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & \frac{p\psi_{f\beta}}{L} \\ 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{p\psi_{f\alpha}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (22)$$

Równanie momentów określa iloczyn wektorowy wektora strumienia i prądu:

$$\mathbf{T} = \frac{3}{2} p (\Psi \times \mathbf{i}) = \frac{3}{2} p \begin{bmatrix} \psi_\alpha & \psi_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} = \frac{3}{2} p \begin{bmatrix} \psi_{i\alpha} & \psi_{i\beta} \\ i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} + \frac{3}{2} p \begin{bmatrix} \psi_{f\alpha} & \psi_{f\beta} \\ i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ponieważ iloczyn wektorowy strumienia samoindukcji i prądu jest równy zeru

$$\begin{bmatrix} \psi_{i\alpha} & \psi_{i\beta} \\ i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} Li_\alpha & Li_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} = L(i_\alpha i_\beta - i_\alpha i_\beta) = 0 \quad (24)$$

to moment wytwarzany przez silnik równa się iloczynowi wektorowemu składowej wektora strumienia od magnesów trwałych i prądu twornika:

$$\mathbf{T} = \frac{3}{2} P \begin{bmatrix} \psi_{f\alpha} & \psi_{f\beta} \\ i_{\alpha} & i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} P (\psi_{f\alpha} i_{\beta} - \psi_{f\beta} i_{\alpha}) \quad (25)$$

a równanie momentów zapisujemy jako iloczyn skalarny wektorów:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left[ -\frac{3}{2} \frac{P\psi_{f\beta}}{J} \frac{3}{2} \frac{P\psi_{f\alpha}}{J} - \frac{k_t}{j} \right] \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ \omega \end{bmatrix} + \frac{1}{J} T_o \quad (26)$$

Łącząc równania napięć z równaniem momentów, otrzymujemy równania stanu silnika synchronicznego o magnesach trwałych we współrzędnych ortogonalnych. Są to podstawowe równania dla przeprowadzenia analizy pracy silnika.

Zmiennymi stanu są składowe ortogonalne wektora prądu  $i_{\alpha}$   $i_{\beta}$  oraz prędkość kątowna silnika  $\omega$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{\beta}}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & \frac{p\psi_{f\beta}}{L} \\ 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{p\psi_{f\alpha}}{L} \\ -\frac{3}{2} \frac{p\psi_{f\beta}}{J} & \frac{3}{2} \frac{p\psi_{f\alpha}}{J} & -\frac{k_t}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \\ T_o \end{bmatrix} \quad (27)$$

Regulacja napędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych wymaga pomiaru chwilowych wartości napięć i prądów, estymacji chwilowych wartości strumienia i regulacji chwilowych wartości sygnałów wyjściowych. Ma to istotne konsekwencje związane z przyjętą teorią mocy.

## 5. TEORIA CHWILOWYCH WARTOŚCI MOCY UKŁADU TRÓJFAZOWEGO

Dyskusje nad sposobami określania mocy biernej, czynnej i pozornej w obwodach elektrycznych, szczególnie dla przebiegów odkształconych od sinusoidy, trwają od lat i jak można rozumieć, cykle ostatnich publikacji dalekie są od zakończenia. Dla określenia istoty przemian energetycznych w obwodach elektrycznych coraz bardziej wydaje się konieczny bezpośredni pomiar oraz interpretacja mocy chwilowych i energii chwilowych. Posługiwanie się w różnych analizach wartościami chwilowymi sygnałów elektrycznych oraz przebiegami chwilowymi mocy i energii powinno być standardem, gdyż współczesne techniki pomiaru i rejestracji umożliwiają obserwację tych wielkości i odtwarzanie ich przebiegów dla dostatecznie długich przedziałów czasu. Ponadto znajomość przebiegów czasowych, a więc przebiegów obrazujących bezpośrednio stan fizyczny, umożliwi jednoznaczną interpretację stanu pracy praktycznie dowolnych układów, w tym i układów nieliniowych, parametrycznych oraz zawierających elementy sterowane, pobudzone sygnałami o dowolnych kształtach. Możliwości takich nie zapewniają analizy, bazujące na uśrednionych pomiarach mocy i energii, wyrażanych poprzez wartości skuteczne prądów i napięć.

Istotnie w obwodzie jednofazowym przy nieokresowych przebiegach napięcia i prądu można jednoznacznie określić jedynie moc chwilową jako iloczyn chwilowych wartości napięcia i prądu:

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (28)$$

Natomiast określenie składowej czynnej, biernej i wartości pozornej mocy, jest trudne lub niemożliwe. W układach elektrycznych, pomiędzy energią elektryczną dostarczaną do układu  $w(t)$  a mocą energii, nazywaną chwilową mocą elektryczną  $p(t)$ , istnieje związek w postaci:

$$p(t) = \pm \frac{\partial w(t)}{\partial t} \quad (29)$$

Przyjmuje się zazwyczaj, że znak „+” dotyczy przypadku, gdy energia jest w układzie rozpraszana lub kumulowana, a znak „-” występuje w przypadku dostarczania energii z zewnątrz, na przykład z autonomicznych źródeł. Zgodnie z tą definicją, moc chwilowa jest szybkością zmian energii.

Jeśli więc potrafimy określić moce chwilowe elementów układu i układu jako całości, to wykorzystując wyrażenie (29) oraz prawo zachowania energii, wyrażone poprzez prawo zachowania mocy chwilowych, potrafimy wyznaczyć wartości chwilowe energii układu i jego poszczególnych elementów, a tym samym potrafimy obserwować jej zmiany w określonych przedziałach czasu.

W 1983 r. ogłoszona została przez H. Akagiego, A. Nabaea oraz Y. Kanazawę nowa teoria mocy w dziedzinie czasu, nazwana teorią chwilowej mocy biernej (ang. *Instantaneous Reactive Power Theory*). Teoria ta ma zastosowanie dla układów wielofazowych, w których napięcia i prąd zapisywane są wektorowo. Najczęściej stosowana jest do układów trójfazowych [3, 4, 5].

Teoria ta jest zasadniczo odmienna od wszystkich innych, gdyż nie operuje takimi pojęciami, jak moc czynna, bierna pozorna czy współczynnik mocy w ich tradycyjnym sensie. Nie interpretuje też zjawisk energetycznych w obwodzie elektrycznym. Jest to bardziej algorytm sterowania kompensatora aktywnego, niż teoria mocy. Realizuje bardziej cele praktyczne, niż poznawcze. Proponując algorytm sterowania, niewymagający analizy harmonicznej przebiegów, teoria ta wzbudziła jednak duże zainteresowanie.

Wartość chwilową mocy czynnej określamy jako iloczyn skalarny wektorów napięcia i prądu:

$$P_E = \frac{3}{2} \cdot (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i}) = \frac{3}{2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \cdot (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) = \frac{3}{2} |\mathbf{u}| |\mathbf{i}| \cos(\varphi) = S_E \cos(\varphi) \quad (30)$$

Wartość chwilową mocy biernej określamy jako iloczyn wektorowy wektorów napięcia i prądu:

$$Q_E = \frac{3}{2} \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{i}) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \cdot (u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha) = \frac{3}{2} |\mathbf{u}| |\mathbf{i}| \sin(\varphi) = S_E \sin(\varphi) \quad (31)$$

Wartość chwilową mocy pozornej określamy jako pierwiastek z sumy kwadratów mocy czynnej i biernej:

$$\begin{aligned} S_E &= \sqrt{P_E^2 + Q_E^2} = \frac{3}{2} \sqrt{(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta)^2 + (u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha)^2} = \\ &= \frac{3}{2} \sqrt{u_\alpha^2 i_\alpha^2 + 2u_\alpha u_\beta i_\alpha i_\beta + u_\beta^2 i_\beta^2 + u_\alpha^2 i_\beta^2 - 2u_\alpha u_\beta i_\alpha i_\beta + u_\beta^2 i_\alpha^2} = \\ &= \frac{3}{2} \sqrt{u_\alpha^2 (i_\alpha^2 + i_\beta^2) + u_\beta^2 (i_\alpha^2 + i_\beta^2)} = \frac{3}{2} \sqrt{(u_\alpha^2 + u_\beta^2) (i_\alpha^2 + i_\beta^2)} = \frac{3}{2} |\mathbf{u}| |\mathbf{i}| \end{aligned} \quad (32)$$

Wartość chwilową współczynnika mocy określamy jako stosunek wartości chwilowych mocy czynnej i mocy biernej:

$$\cos(\varphi) = \frac{P_E}{S_E} = \frac{u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta}{\sqrt{(u_\alpha^2 + u_\beta^2) (i_\alpha^2 + i_\beta^2)}} \quad (33)$$

Istotnym pojęciem są wartości chwilowe składowych prądu czynnej i biernej. Określa się je jako rzuty wektora prądu na wektor napięcia.

Wartości chwilowe składowych prądu określamy jako:

składową czynną

$$I_{ac} = \frac{u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta}{\sqrt{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)}} \quad (34)$$

i składową bierną

$$I_{re} = \frac{u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha}{\sqrt{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)}} \quad (35)$$

Powyższe zależności zastosowane zostały w zapisie procedur regulacyjnych napędu.

## 6. METODA STEROWANIA PRĘDKOŚCIĄ POJAZDU

Kierowanie pojazdem polega na ustalaniu przez kierowcę następujących wielkości:

1. kierunku ruchu pojazdu, do przodu lub do tyłu;
2. prędkości, z jaką powinien jechać pojazd;
3. chwilowego przyspieszenia lub spowolnienia pojazdu;
4. odległości, którą ma przejechać pojazd.

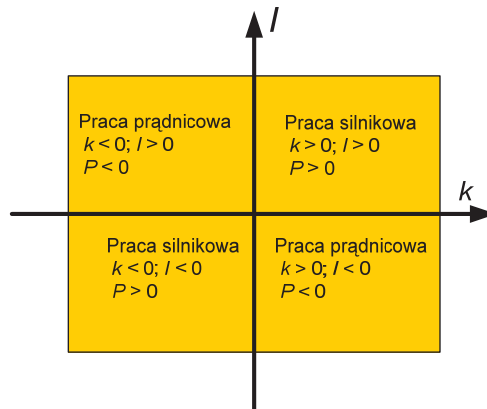
Podczas jazdy kierowca ocenia aktualną prędkość, przyspieszenie lub spowolnienie pojazdu i we właściwy sposób reaguje, zwiększając lub zmniejszając wartość zadaną momentu napędowego. Kierowca jest więc „regulatorem prędkości pojazdu”. Układ na-

pędowy pojazdu stanowi dla kierowcy element wykonawczy, którego celem działania jest regulowanie momentu napędowego lub wielkości proporcjonalnej do momentu, np. prądu.

W opisywanym przypadku sygnałami wejściowymi napędu są:

1. kierunek ruchu pojazdu;
2. wartość amplitudy prądów fazowych silnika synchronicznego.

Taki układ sygnałów wejściowych umożliwia pracę silnikową lub prądnicową napędu. (rys. 10).



**Rys. 10. Obszar sterowania napędem w czterech ćwiartkach „kierunek ruchu – prąd”:**

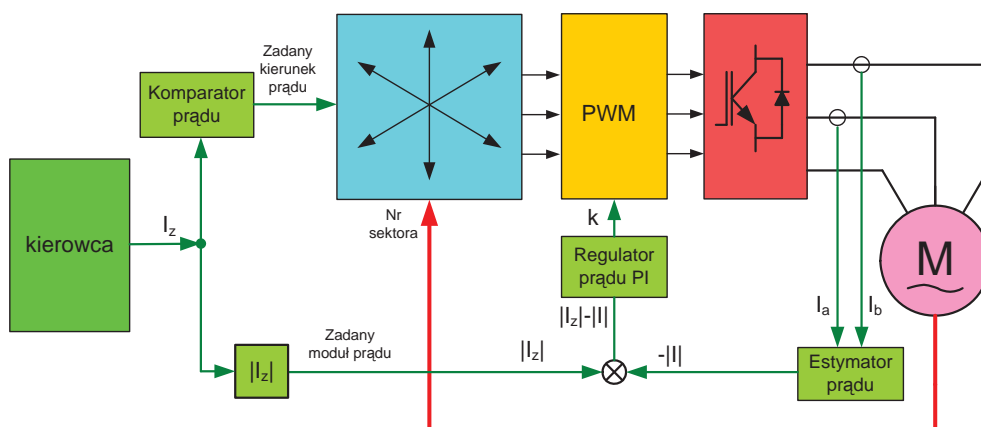
$k$  – zadany kierunek ruchu,  $k = \pm 1$ ;

$I$  – zadana wartość amplitudy prądu  $I_{\max} < I < I_{\max}$

Napięcia fazowe silnika są synchronizowane względem wirnika, tak, aby położenie wektora prądu było prostopadłe do wektora strumienia. Przy takim ustawieniu wektorów strumienia i prądu wartość momentu napędowego rozwijanego przez silnik jest proporcjonalna do wartości prądu [6].

W napędzie wybrano metodę bezpośredniej regulacji prądu z modulacją wektora napięcia (DCC-SVM: ang. *Direct Current Control with Space Vector Modulation*). Zastosowanie bezpośredniej regulacji prądu, a nie momentu, pozwoliło na znaczne uproszczenie programu regulacyjnego. Zrezygnowano z estymacji strumienia, co znacznie uprościło program regulacyjny i przyspieszyło jego wykonywanie. Zastosowanie czujników położenia pozwoliło synchronizować prąd względem wirnika, co powoduje, że moment rozwijany przez silnik jest wprost proporcjonalny do prądu.

W zastosowanej metodzie DCC-SVM wartością regulowaną jest amplituda prądów fazowych silnika, a co za tym idzie, wartości momentu wytwarzanego przez silnik. Wartość sygnału zadającego ustalona jest przez użytkownika pojazdu (pełniącego rolę regulatora prędkości) za pomocą pedałów przyspieszania (gaz) i spowalniania (hamulec). Wartość wyjściowa z regulatora prądu podawana jest na modulator, który na jego podstawie wylicza czasy załączeń poszczególnych kluczy półprzewodnikowych w układzie mostka trójfazowego zasilającego silnik. Sekwencja załączania poszczególnych tranzystorów zsynchronizowana zaś jest za pomocą czujników optycznych z aktualnym położeniem wału silnika (rys. 11).



**Rys. 11. Schemat blokowy metody bezpośredniej regulacji prądu z modulacją wektora napięcia**

Układ regulacji składa się z dwóch pętli:

- pętli bezpośredniej regulacji amplitudy prądu;
- pętli synchronizacji względem położenia wirnika.

Do układu regulacyjnego wprowadzane są dwa sygnały zadające:

- sygnał określający kierunek prądu (momentu);
- sygnał zadający wartość prądu (momentu).

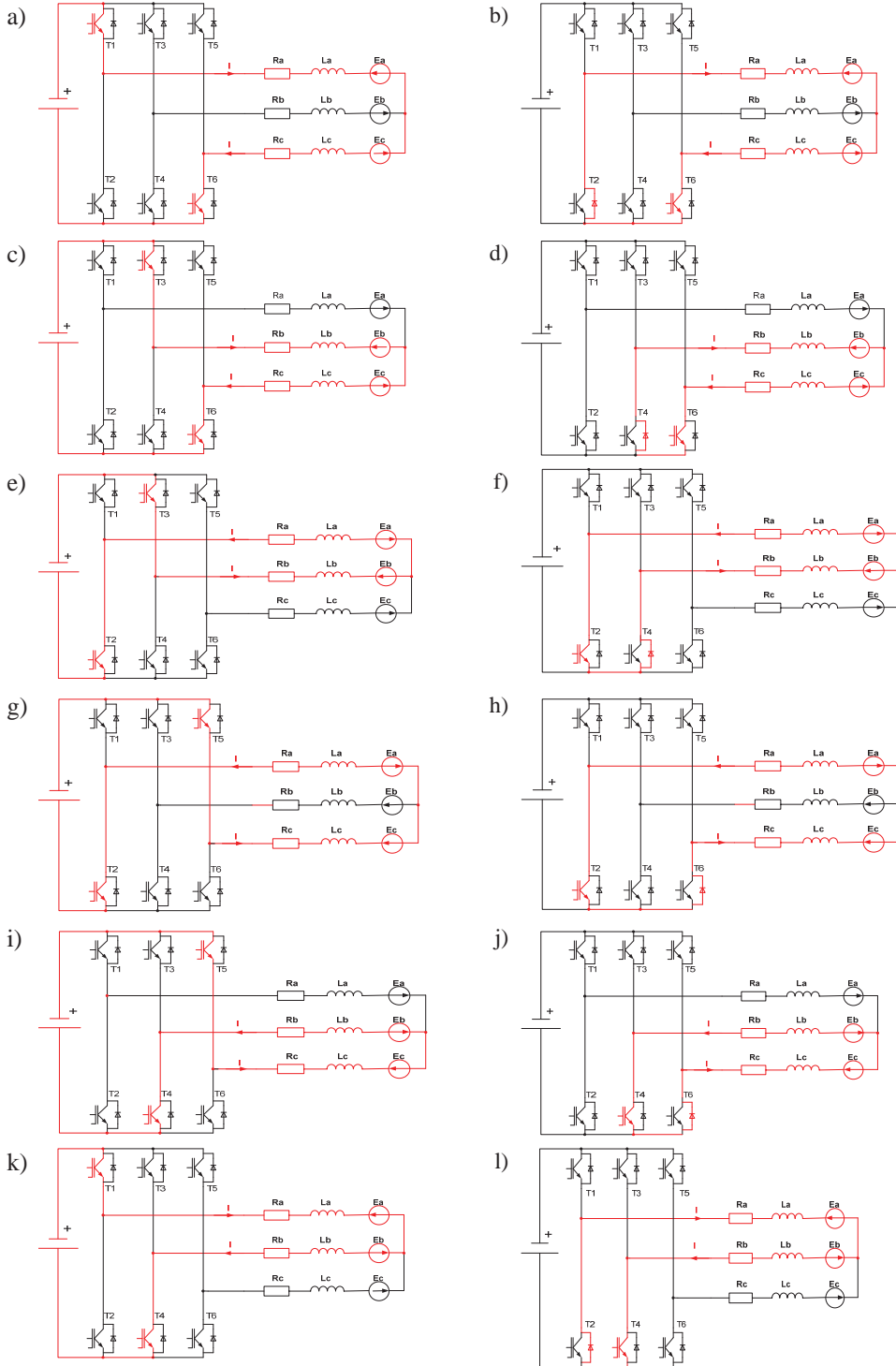
Przyjęta strategia sterowania zakłada, że w poszczególnych sektorach prąd przepływać będzie przez dwie fazy silnika, podczas gdy trzecia faza zostanie wyłączona. Kolejności załączanych faz określa położenie wirnika, co jest tożsame z położeniem wektora strumienia. Fazy załączane są tak, aby wektor prądu był prostopadły do wektora strumienia przy pracy silnikowej, jak i prądnicowej. Przy jeździe z prędkością mniejszą od maksymalnej wartość prądu ograniczana jest przez modulację PWM wektora napięcia.

Kierunek przepływu prądu w dwóch fazach w stanie załączenia i wyłączenia tranzystorów podczas pracy silnikowej przedstawiono na rysunku 12. Strategia ta spełnia warunki podstawione przed układem napędowym pojazdu. Zapewnia dobrą dynamikę i pełen komfort jazdy. Silniki nie emitują uciążliwych drgań i hałasów, co jest ważne zwłaszcza w przeznaczeniu pojazdu do transportu turystów.

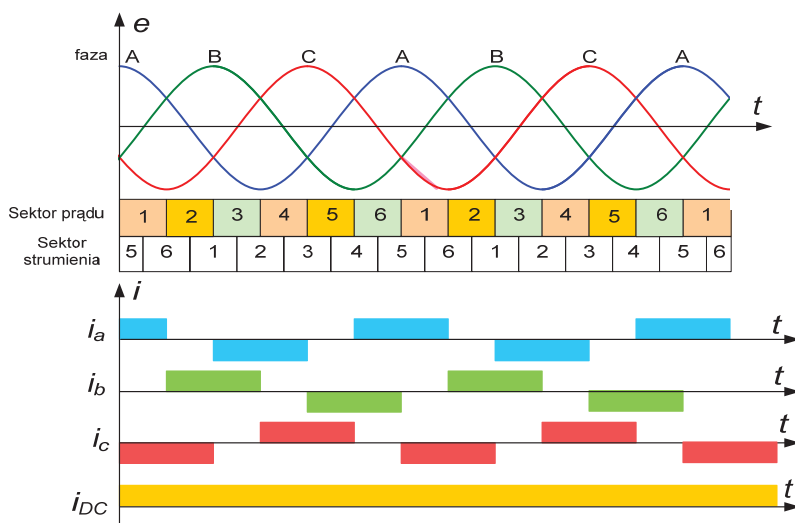
**Rys. 12. Kierunek przepływu prądu w fazach w kolejnych sektorach. Praca silnikowa:**

- sektor 1 tranzystor T1 załączony, b) sektor 1 tranzystor T1 wyłączony,
- sektor 2 tranzystor T3 załączony, d) sektor 2 tranzystor T3 wyłączony,
- sektor 3 tranzystor T3 załączony, f) sektor 3 tranzystor T3 wyłączony,
- sektor 4 tranzystor T5 załączony, h) sektor 4 tranzystor T5 wyłączony,
- sektor 5 tranzystor T5 załączony, j) sektor 5 tranzystor T5 wyłączony,
- sektor 6 tranzystor T1 załączony, l) sektor 6 tranzystor T1 wyłączony





Podczas pracy silnikowej napędu położenie wektora prądu wyprzedza położenie wektora strumienia. Prądy przepływające przez uzwojenia dwóch kolejnych faz ustawiają wektor prądu w połowie danego sektora. Podczas obrotu wirnika wektor strumienia jest prawie prostopadły (z dokładnością do  $\frac{1}{6}\pi$ ) do wektora prądu. Przemieszcza się on względem prądu w zakresie kątów od  $(\frac{1}{2}\pi + \frac{1}{6}\pi) = \frac{2}{3}\pi$  do  $(\frac{1}{2}\pi - \frac{1}{6}\pi) = \frac{1}{3}\pi$  (rys. 13, 14) (tab. 2).

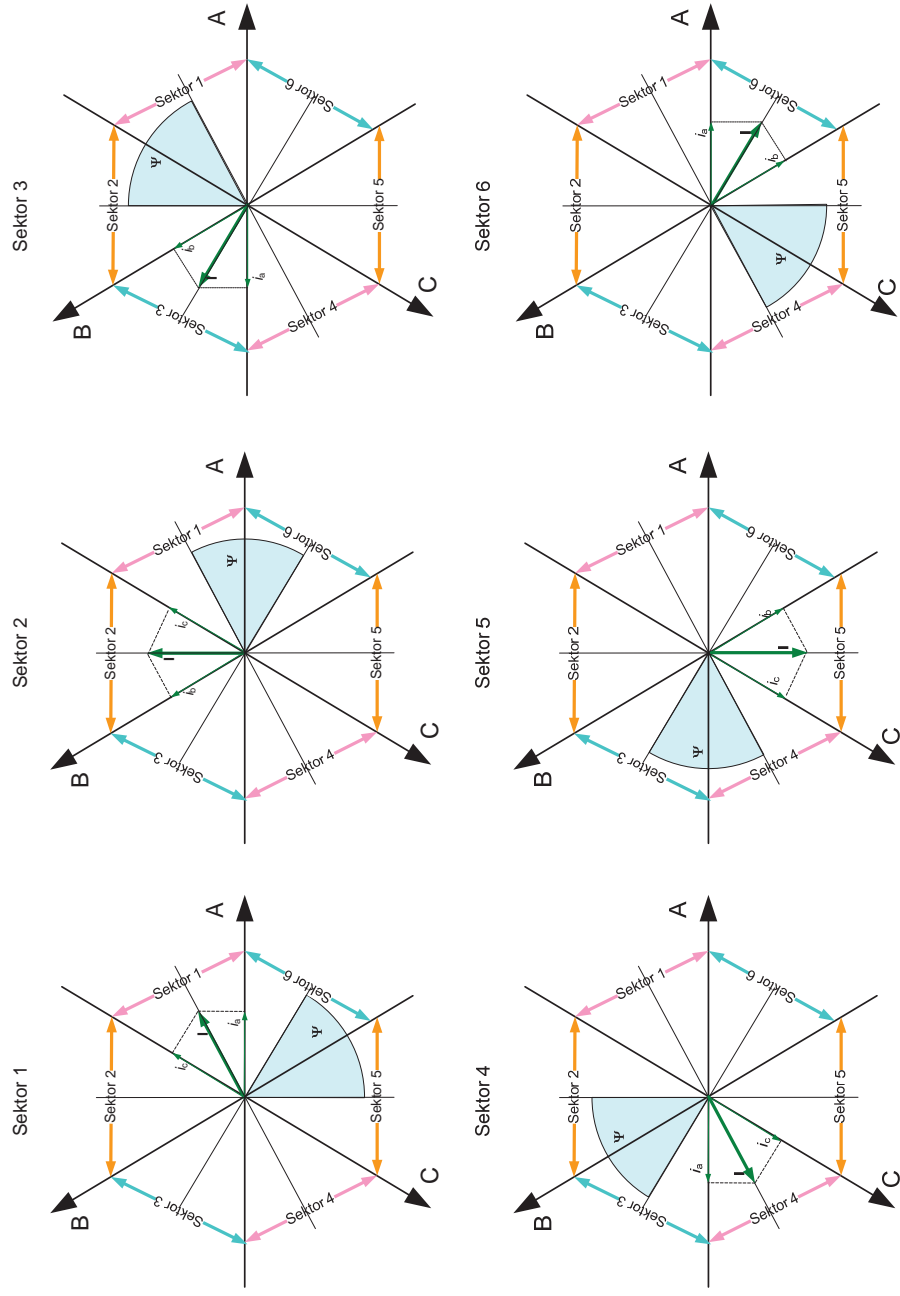


Rys. 13. Schemat przełączania prądów w poszczególnych fazach dla kolejnych sektorów wektora prądu przy pracy silnikowej napędu

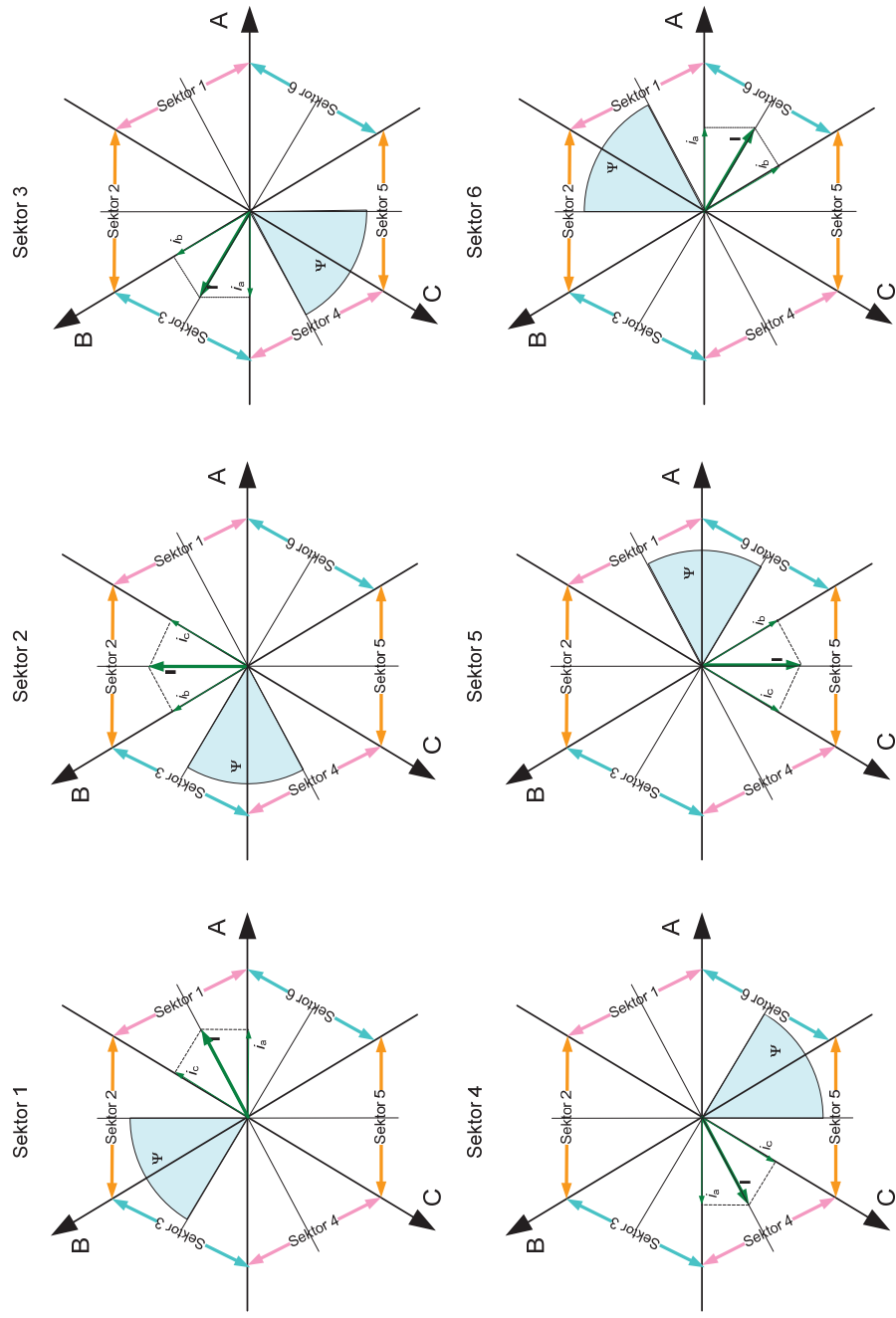
TABELA 2

Numery załączanych tranzystorów przekształtnika podczas pracy silnikowej napędu

Sektor prądu	Sektor strumienia	Faza wejściowa	Faza wyjściowa	Faza nieczynna	Tranzystor załączany 1	Tranzystor załączany 2
1	5-6	A	C	B	T1/T2	T6
2	6-1	B	C	A	T3/T4	T6
3	1-2	B	A	C	T3/T4	T2
4	2-3	C	A	B	T5/T6	T2
5	3-4	C	B	A	T5/T6	T4
6	4-5	A	B	C	T1/T2	T4



Rys. 14. Położenie wektorów prądu i strumienia twornika w kolejnych sektorach przy pracy silnikowej napędu



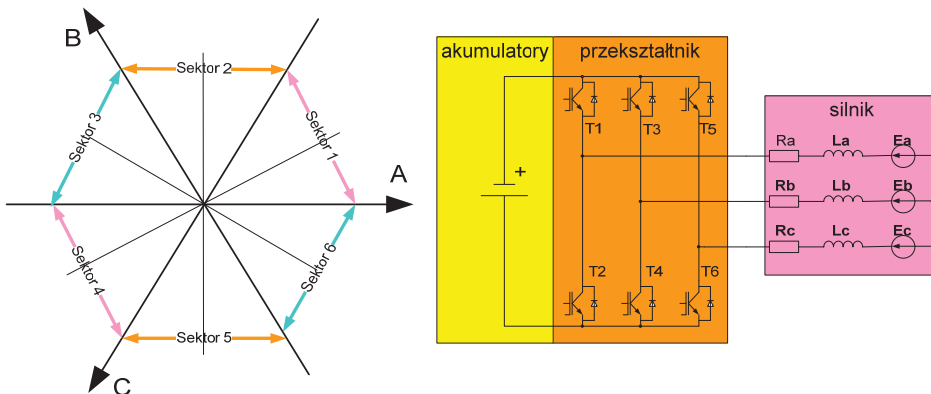
Rys. 15. Położenie wektorów prądu i strumienia twornika w kolejnych sektorach przy pracy prądu napędu

Podczas pracy prądnicowej napędu położenie wektora prądu opóźnia się za położeniem wektora strumienia. Analogicznie do pracy silnikowej, prądy przepływające przez uzwojenia dwóch kolejnych faz ustawiają wektor prądu w połowie danego sektora. Podczas obrotu wirnika wektor strumienia jest prawie prostopadły (z dokładnością do  $\frac{1}{6}\pi$ ) do wektora prądu. Przemieszcza się on względem prądu w zakresie kątów od  $(\frac{1}{2}\pi + \frac{1}{6}\pi) = \frac{2}{3}\pi$  do  $(\frac{1}{2}\pi - \frac{1}{6}\pi) = \frac{1}{3}\pi$  (rys. 15) (tab. 3).

TABELA 3

Numerы załączanych tranzystorów przekształtnika podczas pracy prądnicowej napędu

Sektor prądu	Sektor strumienia	Faza wejściowa	Faza wyjściowa	Faza nieczynna	Tranzystor załączany 1	Tranzystor załączany 2
1	2-3	A	C	B	T1/T2	T6
2	3-4	B	C	A	T3/T4	T6
3	4-5	B	A	C	T3/T4	T2
4	5-6	C	A	B	T5/T6	T2
5	6-1	C	B	A	T5/T6	T4
6	1-2	A	B	C	T1/T2	T4



Rys. 16. Oznaczenie sektorów silnika we współrzędnych trójfazowych

## 7. BADANIA SYMULACYJNE NAPĘDU POJAZDU

W celu weryfikacji przyjętej metody sterowania silnikami, zbudowany został model symulacyjny układu napędowego. Model symulacyjny układu zawiera:

- model silnika synchronicznego o magnesach trwałych;
- model przekształtnika tranzystorowego;
- model pętli regulacyjnych realizujących metodę bezpośredniej regulacji prądu z modulacją wektora napięcia (DCC-SVM).

Do obliczeń przyjęto parametry odpowiadające parametrom zbudowanych modeli doświadczalnych silników: rezystancja faz  $R = 0,3 \Omega$ ; indukcyjność faz  $L = 1 \text{ mH}$ ; stała napięciowa  $k_e = 5,0 \text{ V/rad/s}$ ; stała momentowa  $k_m = 5,0 \text{ Nm/A}$ ; moment bezwładności wirnika  $J = 0,4 \text{ kgm}^2$ .

Przyjęto moment bezwładności pojazdu sprowadzony do wału silnika  $J = 30 \text{ kgm}^2$ . Przyjęto też współczynniki oporu ruchu

$$k_1 = \frac{T}{\omega} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}}; \quad k_2 = \frac{T}{\omega^2} = 0.1 \frac{\text{Nm}}{(\text{rad/s})^2}; \quad k_3 = \frac{T}{\omega^3} = 0.01 \frac{\text{Nm}}{(\text{rad/s})^3};$$

Obliczane były przebiegi czasowe sygnałów podczas cyklu pracy złożonego z rozruchu do wartości ustalonej dodatniej prędkości oraz nawrotu od wartości ustalonej dodatniej prędkości do wartości ustalonej ujemnej. Symulowany czas pracy wyniósł 25 s.

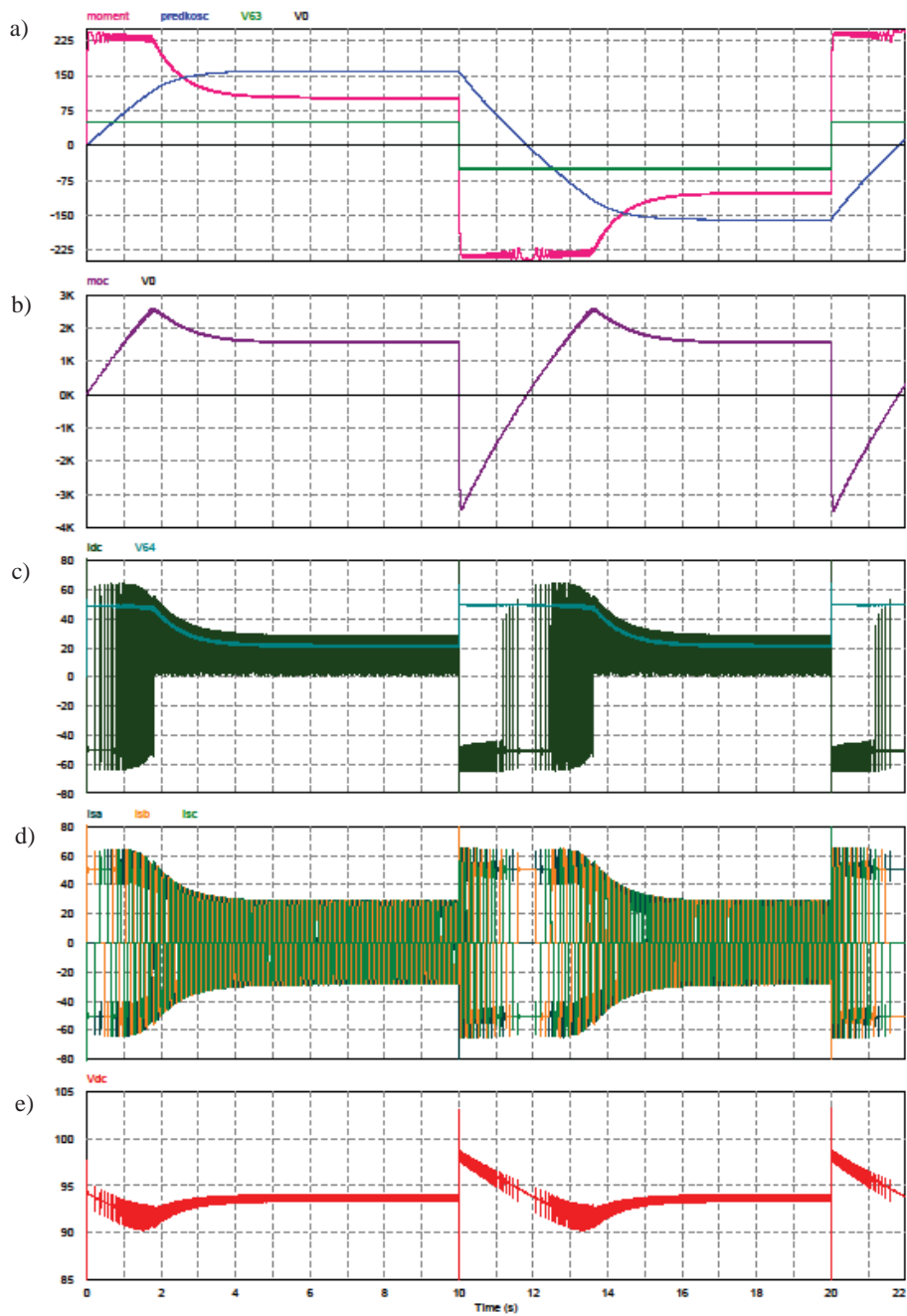
Sygnał zadający prąd, zawierał w sobie informację o kierunku prądu i zadanej wartości modułu wektora prądu. Zadawano prąd +50 A (ruch do przodu), a następnie nawrót (od +50 A do -50 A).

Poszczegółne przebiegi (rys. 17, 18, 19) przedstawiają:

- przebieg momentu napędowego i prędkości obrotowej podczas rozruchu, jazdy ze stałą prędkością, a następnie nawrotu. Wartość momentu podczas rozruchu i nawrotu osiąga przyjętą wartość maksymalną 250 Nm. Przyspieszenie osiąga wartość  $a = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ , zgodną z wymaganiami (rys. 17a);
- moc mechaniczną silnika, dodatnią podczas rozruchu i jazdy do przodu i do tyłu, która zmienia swój znak podczas nawrotu, co oznacza oddawanie energii elektrycznej do akumulatorów, czyli hamowanie generatorowe (rys. 17b);
- przebiegi prądów: obwodu pośredniczącego, modułu prądu i prądów fazowych (rys. 17c i d);
- przebieg napięcia zasilającego pokazuje jego spadek od wartości znamionowej podczas rozruchu i jazdy ze stałą prędkością (rys. 17e). Chwilowy wzrost napięcia podczas nawrotu świadczy o hamowaniu generatorowym.

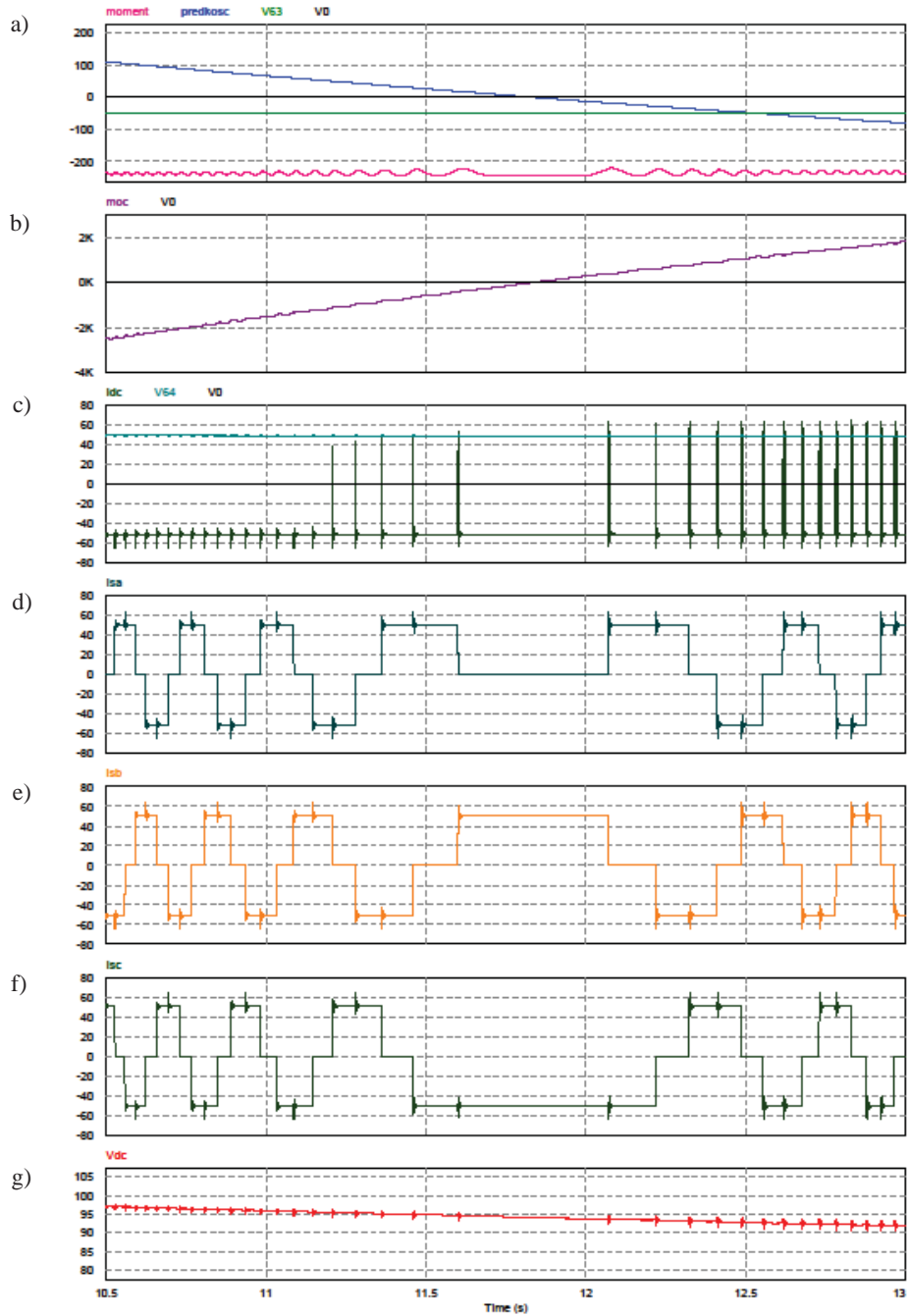
Rysunek 18 pokazuje obliczone przebiegi podczas przechodzenia prędkości obrotowej przez zero, w czasie 2,5 s. Rysunek 19 pokazuje obliczone przebiegi podczas skokowej zmiany kierunku prądu. Czas obliczeń 2 s. Na tych rysunkach, przy rozszerzonej podstawie czasu, wygodnie jest obserwować przebiegi prądów fazowych.

Wyniki przeprowadzonych symulacji w pełni odzwierciedlają zachowanie się rzeczywistego układu napędowego.



**Rys. 17. Przebiegi czasowe podczas rozruchu i nawrotu silnika:**

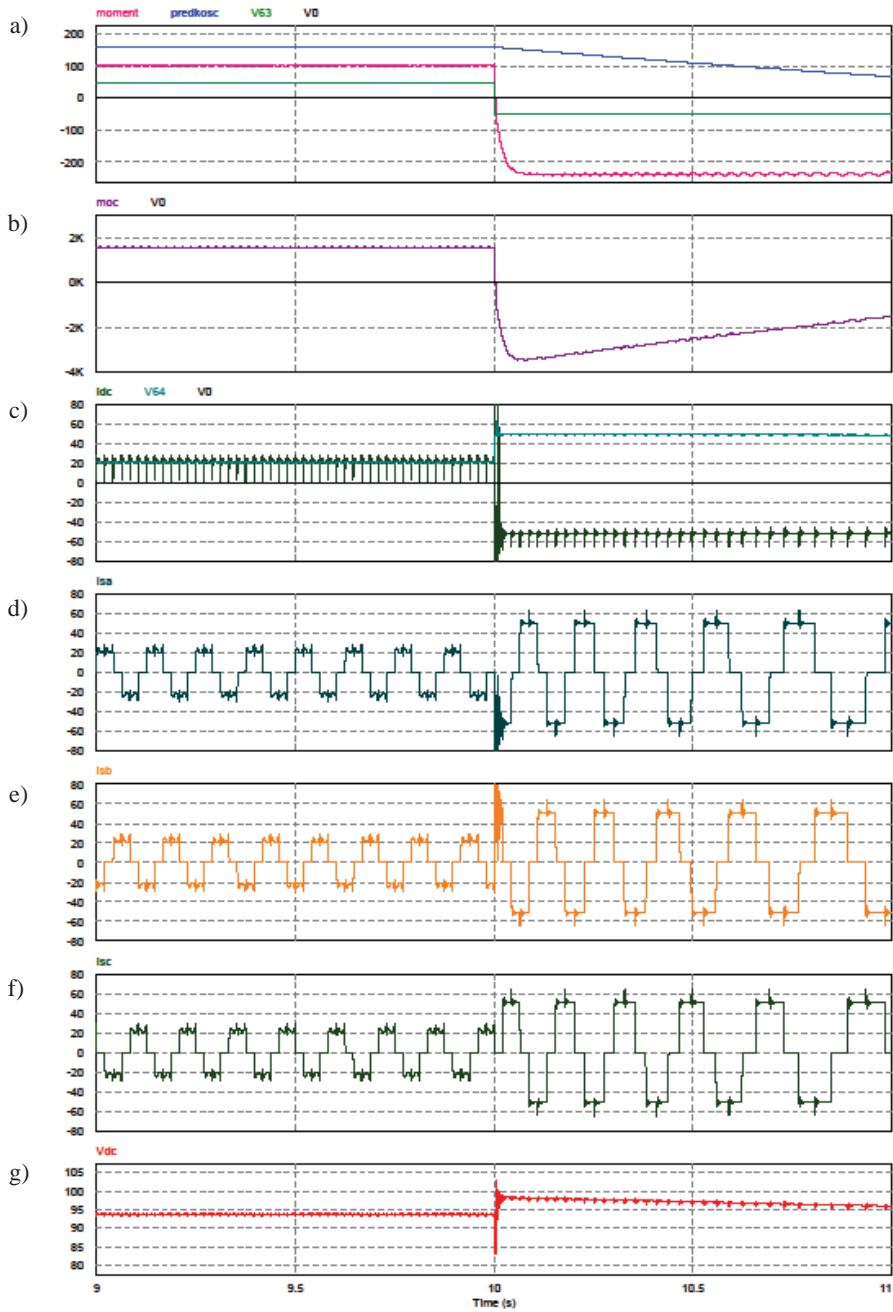
a) moment, prędkość, sygnał zadający prąd; b) moc mechaniczna napędu; c) prąd obwodu pośredniczącego, moduł prądu; d) prąd fazy A, fazy B, fazy C; e) napięcie zasilające DC



**Rys. 18. Przebiegi czasowe podczas nawrotu przy przejściu prędkości przez zero:**

a) moment, prędkość, sygnał zadający prąd; b) moc mechaniczna napędu; c) prąd obwodu pośredniczącego, moduł prądu; d) prąd fazy A; e) prąd fazy B; f) prąd fazy C; g) napięcie zasilające DC





**Rys. 19. Przebiegi czasowe podczas zmiany kierunku prądu zadającego  $\pm 50$  A:** a) moment, prędkość, sygnał zadający prąd; b) moc mechaniczna napędu; c) prąd obwodu pośredniczącego, moduł prądu; d) prąd fazy A; e) prąd fazy B; f) prąd fazy C; g) napięcie zasilające DC

## 8. BADANIA DOŚWIADCZALNE NAPĘDU POJAZDU

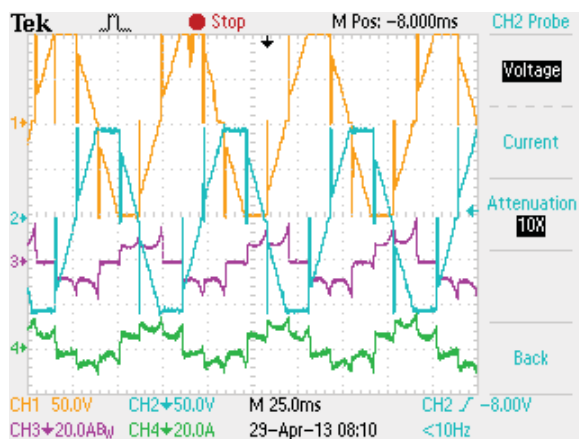
Badania doświadczalne napędu pojazdu przeprowadzono podczas jazd testowych po terenie Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Mierzone i rejestrowane były w pamięci oscyloskopu następujące przebiegi czasowe sygnałów:

1. Napięcie przewodowe między fazami A–B; 50 V/dz.
2. Napięcie przewodowe między fazami A–C; 50 V/dz.
3. Prąd fazy A 20 A/dz.
4. Prąd fazy B 20 A/dz.

Podstawa czasu zmieniana była w zależności od rodzaju pracy 25 ms/dz lub 500 ms/dz. Wartość napięcia zasilającego z akumulatorów wynosiła 105 V.

Badania wykonywane były podczas różnych warunków jazdy. Dla przykładu przedstawiono przebiegi podczas jazdy:

- jazda do przodu z maksymalną prędkością (rys. 20). Ponieważ siła elektromotoryczna silnika jest duża, pętla regulacyjna prądu jest przzerwana i modulator PWM nie pracuje. Prędkość kątowna silników ograniczana jest wartością napięcia zasilającego. Wartość prądu zasilającego silnik odpowiadająca momentowi równemu oporom ruchu, jest mniejsza od wartości zadanej prądu;

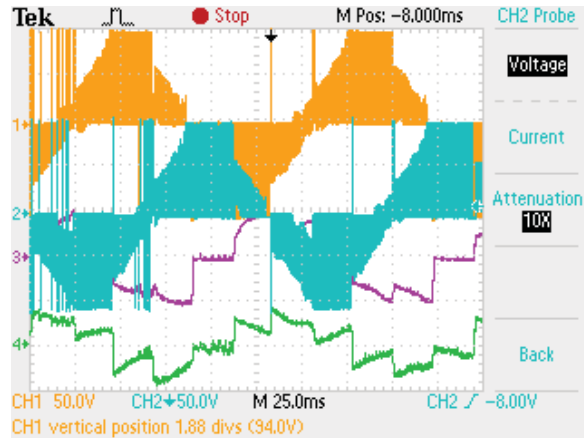


**Rys. 20. Przebiegi napięć i prądów w napędzie koła prawego. Jazda do przodu z pełną prędkością:**

- 1 – napięcie przewodowe między fazami A–B; 50 V/dz;
- 2 – napięcie przewodowe między fazami A–C; 50 V/dz;
- 3 – prąd fazy A; 20 A/dz;
- 4 – prąd fazy B; 20 A/dz.

Podstawa czasu 25 ms/dz

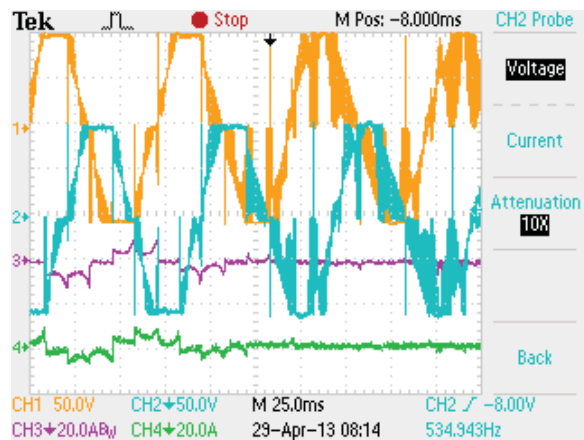
- jazda do przodu z prędkością mniejszą od maksymalnej (rys. 21). Ponieważ siła elektromotoryczna silnika jest mniejsza od napięcia zasilającego, pracuje pętla regulacyjna prądu i regulator PWM obniża wartość napięć fazowych. Wartość prądu zasilającego silnik odpowiadająca momentowi równemu oporom ruchu jest zgodna z wartością zadaną prądu;



**Rys. 21. Przebiegi napięć i prądów w napędzie koła prawego. Jazda do przodu z niepełną prędkością:**

1 – napięcie przewodowe między fazami A-B; 50 V/dz;  
 2 – napięcie przewodowe między fazami A-C; 50 V/dz;  
 3 – prąd fazy A: 20 A/dz; 4 – prąd fazy B: 20 A/dz.  
 Podstawa czasu 25 ms/dz

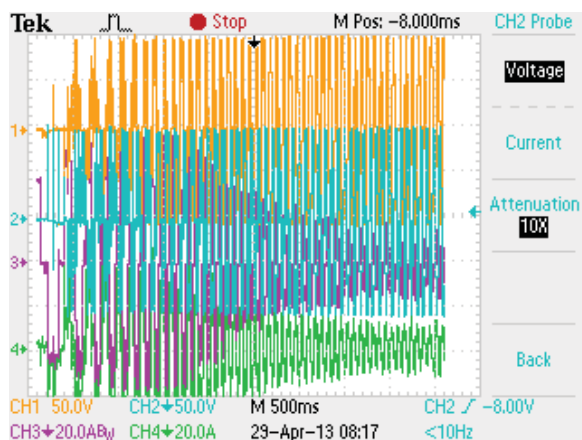
- przejście od jazdy ze stałą prędkością (maksymalną) do jazdy wybiegiem (rys. 22). Zadanie wartości prądu równej zero powoduje, że prąd w fazach silnika przestaje płynąć. Pętla regulacyjna prądu ogranicza wartości prądów do zera. Modulator PWM dostarcza wartości napięć fazowych do wartości sił elektromotorycznych;



**Rys. 22. Przebiegi napięć i prądów w napędzie koła prawego. Jazda do przodu wybiegiem:**

1 – napięcie przewodowe między fazami A-B; 50 V/dz;  
 2 – napięcie przewodowe między fazami A-C; 50 V/dz;  
 3 – prąd fazy A: 20 A/dz; 4 – prąd fazy B: 20 A/dz.  
 Podstawa czasu 25 ms/dz

- rozruch silnika od prędkości zerowej do maksymalnej (rys. 23). Podczas rozruchu pętla regulacji prądu ogranicza prądy fazowe do wartości 50 A. Po osiągnięciu prędkości bliskiej maksymalnej, pętla regulacji prądu zostaje przerwana, a wartości prądów fazowych silnika odpowiadają momentowi równemu oporom ruchu. Wartość prądu jest mniejsza od wartości zadanej prądu.



**Rys. 23. Przebiegi napięć i prądów w napędzie koła prawego. Jazda do przodu z pełną prędkością:**

- 1 – napięcie przewodowe między fazami A-B; 50 V/dz;
  - 2 – napięcie przewodowe między fazami A-C; 50 V/dz;
  - 3 – prąd fazy A; 20 A/dz; 4 – prąd fazy B; 20 A/dz.
- Podstawa czasu 500 ms/dz

Zarejestrowane przebiegi czasowe napięć i prądów dokumentują poprawną, zgodną z założeniami pracę napędu pojazdu.

## 9. WNIOSKI

Napęd pojazdu turystycznego osobowo-towarowego, opracowany w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie, charakteryzuje się następującymi cechami:

- w napędzie pojazdu zastosowano dwa silniki synchroniczne o magnesach trwałych z wirnikiem zewnętrznym. Są to silniki momentowe, wolnobieżne, zamontowane bezpośrednio bez przekładni mechanicznej w kole napędowym pojazdu. Takie rozwiązanie znacznie zmniejsza opory ruchu oraz pozwala na jazdę wybiegiem;
- zastosowano mikroprocesorowy układ regulacyjny, sterujący dwoma przekształtnikami tranzystorowymi, zasilającymi dwa silniki synchroniczne. Jeden program regulacyjny realizuje sterowanie dwóch układów napędowych. Zapewnia pracę silnikową i prądnicową z możliwością regulacji momentu (prądu)

i zmian prędkości kątovej oraz realizuje elektronicznie (programowo) układ różnicowy napędów;

- pod względem regulacyjnym jest to układ napędowy dwusilnikowy, w którym pętle regulacyjne realizowane są przez jeden program regulacyjny i wykonywane przez jeden procesor sygnałowy. Takie rozwiązanie upraszcza układ sprzętowy, gdyż układ tradycyjny wymagałby trzech procesorów: dwóch sterujących napędami i jednego nadrzędnego oraz trzech programów regulacyjnych pracujących synchronicznie.

---

Praca finansowana była przez NCBiR z projektu nr NR01 0005 10.

## LITERATURA

1. Janaszek M., Moradewicz A.: Napędy z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych do pojazdów turystycznych. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Modelowanie, Symulacja i Zastosowania w Technice – MSiZwT”, Kościelisko, 13-17 czerwca 2011, materiały konferencyjne str. 89-94.
2. Zawirski K.: Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2005.
3. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. IIEE JPEC-Tokyo, 1983, p. 1375.
4. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. IEEE Trans. on In. App. no 3/1984.
5. Akagi H., Nabae A.: The p-q Theory in Three-Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions. ETEP vol. 3, 1/1993.
6. Kaźmierkowski M. P., Krishnan R., Blaabjerg F.: Control In Power Electronics. Selected Problems. Academic Press 2002.

*Rękopis dostarczono dnia 22.05 2013 r.*

## THE DRIVE OF THE TOURIST VEHICLE PASSENGER-CARGO

Michał JANASZEK  
Kamil KWIATKOWSKI

**ABSTRACT** *Article presents the concept of the drive of the tourist vehicle, passenger-cargo with a total weight up to one ton. The drive consists of two convertors controlled by one control circuit, and two motors*

*mounted in the wheels of the vehicle. In the drive uses permanent magnet synchronous motors with the reverse construction. With external rotor which is connected directly to a wheel. The control method supports on one program control of two inverters has been discussed. The simulation and experimental research of the system has been presented.*

**Keywords:** *electric vehicles, electric drive, permanent magnet synchronous motor*

**Dr inż. Michał JANASZEK** – w roku 1974 ukończył studia na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, uzyskując dyplom mgr. inż. elektryka ze specjalnością automatyka. W październiku 1974 r. rozpoczął pracę w Instytucie Elektrotechniki w Zakładzie Elektrycznych Napędów Obrabiarkowych. Specjalizował się w napędach prądu stałego z tranzystorowymi wzmacniaczami mocy dla obrabiarek sterowanych numerycznie i robotów przemysłowych. Zajmował się identyfikacją parametrów dynamicznych maszyn prądu stałego oraz numerycznym modelowaniem dynamiki w syntezie układów napędowych. Brał udział w opracowaniu i przygotowaniu do produkcji napędów dla robotów przemysłowych typu IRb, za co otrzymał nagrodę zespołową stopnia III MHiPM za rok 1986. Od lat osiemdziesiątych zajmuje się napędami z silnikami synchronicznymi, w szczególności problemami optymalizacji sterowania. Rozprawę doktorską „Problemy bezpośredniej regulacji momentu i strumienia silnika synchronicznego o magnesach trwałych” obronił w roku 2001, uzyskując stopień naukowy doktora. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji z zakresu napędu elektrycznego. Od kilku lat zajmuje się napędami przeznaczonymi dla pojazdów osobowych, towarowych lub turystycznych. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej.



**Mgr inż. Kamil Szymon KWIATKOWSKI** – w 2010 roku ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Od 2011 roku jest pracownikiem Zakładu Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki. Obecnie jego głównym obszarem zainteresowania są układy napędowe przeznaczone do pojazdów elektrycznych.