

*XIV Seminarium*  
**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2004**  
Oddział Gdański PTETiS

**BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE  
TRAKCYJNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM IPM**

**Andrzej KAMONCIAK**

Politechnika Gdańska, Katedra Trakcji Elektrycznej

tel. 347-29-71 fax: 341-08-80 email: akamon@ely.pg.gda.pl

W referacie zaprezentowano stanowisko laboratoryjne trakcyjnego układu napędowego z silnikiem IPM zrealizowanego w Katedrze Trakcji Elektrycznej. Przedstawiono model silnika synchronicznego w osiach  $d-q$ , model obwodu sterowania i aproksymację trakcyjnych oporów ruchu w programie PSpice. Porównano zarejestrowane przebiegi charakterystycznych wielkości dla układu rzeczywistego i modelu układu napędowego przy sterowaniu w trybie regulacji momentu. Określono, w jakim stopniu badania symulacyjne trakcyjnego układu napędowego z silnikiem synchronicznym mogą zastąpić eksperyment.

## **1. WSTĘP**

Napędy autonomicznych pojazdów elektrycznych coraz częściej opierają się na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi. Są to rozwiązania kosztowne, stąd na etapie projektu możliwe jest wykorzystanie symulacji komputerowych dla wskazania najkorzystniejszego rozwiązania poprzez określenie własności elektrycznych, energetycznych i mechanicznych pojazdu. Na wstępie badań konieczne jest założenie parametrów pojazdu, takich jak masa całkowita, liczba silników, konfiguracja obwodu głównego i mechanicznego układu przekazywania momentu napędowego. Konieczne jest także określenie wymagań stawianych układowi napędowemu. Do analizowanych własności pojazdu zalicza się maksymalne przyspieszenie, zdolność pokonywania wzniesień oraz zasięg. Nie jest możliwa maksymalizacja wszystkich tych parametrów, stąd konieczny jest kompromis, wspomagany wszechstronną analizą symulacyjną.

## **2. KONFIGURACJA OBWODU GŁÓWNEGO**

W pojazdach z napędem elektrycznym możliwe są dwa rozwiązania obwodu głównego. Pierwszy z nich opiera się na strukturze klasycznego napędu spalinowego i polega na zastąpieniu silnika cieplnego silnikiem elektrycznym oraz zastosowanie jednostopniowej przekładni głównej wraz z układem różnicowym. Drugi wariant z napędem bezpośrednim, opisany w [3], eliminuje pośrednictwo przekładni głównej w przekazywaniu momentu napędowego z silników trakcyjnych na koła napędne. Zwiększa się przez to sprawność całko-

wita układu napędowego. Ponadto, dla wielosilnikowego układu bezprzekładniowego, poprzez niezależne sterowanie momentem każdego koła napędowego, istnieje możliwość poprawienia własności trakcyjnych.

Wykorzystanie bezpośredniego napędu elektrycznego wymusza zastosowanie silników charakteryzujących się dwoma obszarami pracy: ze stałym momentem  $T_e = const$ , oraz ze stałą mocą  $P = const$ . Stały moment w zakresie prędkości od 0 do  $\omega_b$  (prędkości bazowej) ma zapewnić możliwość osiągnięcia wymaganej dynamiki podczas rozruchu, natomiast stała moc w drugiej strefie ma zapewnić możliwość regulacji prędkości w zależności od aktualnego obciążenia. Jest to warunek konieczny dla uzyskania wymaganych parametrów trakcyjnych pojazdu. Silnik trakcyjny przeznaczony do napędu bez przekładni mechanicznej, ze względu na bezpośrednie sprzęgnięcie z kołem napędowym, jest silnikiem wolnoobrotowym; powinien charakteryzować się maksymalnym momentem  $T_e$  na wale przy zerowej prędkości, co zapewni maksymalną dynamikę podczas rozruchu. Wartość momentu rozruchowego  $T_{R(v=0)}$ , w zależności od warunków obciążenia, może być kilkakrotnie większa od momentu silnika dla utrzymania maksymalnej prędkości. Takimi parametrami charakteryzują się silniki synchroniczne z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika.

Do symulacyjnej analizy własności napędowych układu z silnikiem synchronicznym wybrano dwuwymiarowy model silnika w układzie współrzędnych osi  $d$ - $q$  związanych z wirnikiem [8]. Strumień, prądy i napięcia modelu silnika opisane są wektorowo zależnościami (1) – (5):

$$\phi_d = L_d \cdot i_d + \phi_f, \quad (1) \quad \phi_q = L_q \cdot i_q, \quad (2)$$

$$v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q, \quad (3) \quad v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_e \cdot \phi_d, \quad (4)$$

natomiast moment elektromagnetyczny silnika równaniem:

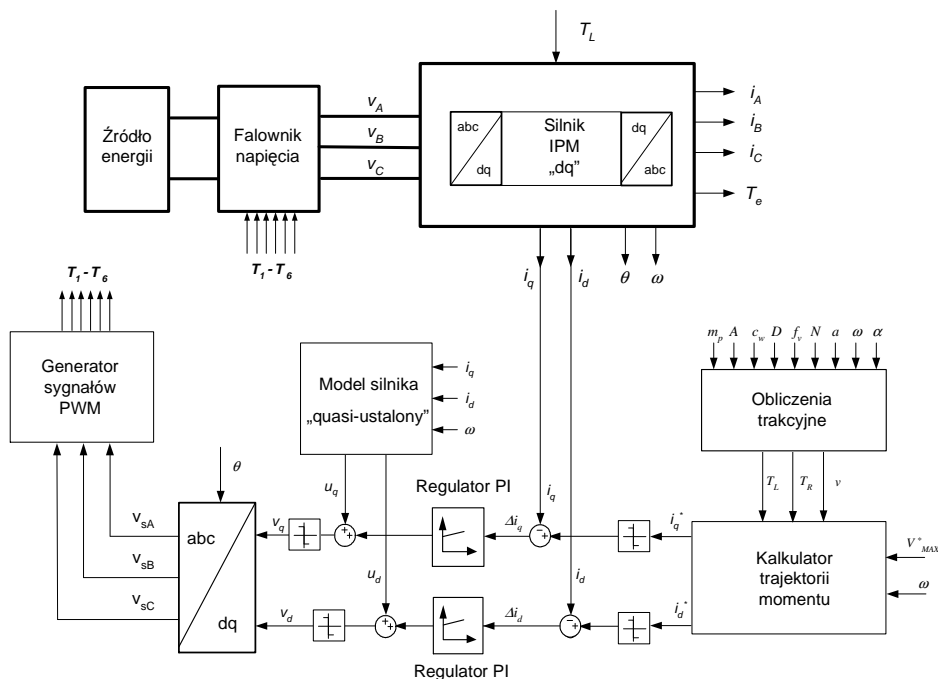
$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d). \quad (5)$$

gdzie:  $R_s$  – rezystancja silnika,  $L_d, L_q$  – indukcyjność w osi podłużnej, poprzecznej,  $\phi_f$  – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych,  $v_d, v_q, i_d, i_q$  – napięcie/prąd w osi podłużnej, poprzecznej.

### 3. MODELE ELEMENTÓW OBWODU GŁÓWNEGO I UKŁADU STEROWANIA

Wspomaganie projektowania układów napędowych może być realizowane z wykorzystaniem szeregu programów symulacyjnych. Można tu wyróżnić programy ADVISOR, PSpice, MATLAB/SIMULINK czy TCAD [1, 2, 9], z zastrzeżeniem, że większość z nich nie jest przewidziana do tego celu – trzeba stworzyć własne modele. Do analizy układu napędowego wybrano program PSpice, który posiada bogatą bibliotekę elementów, na bazie których zbudowano modele elementów obwodu głównego i układu sterowania, przedstawione na rys. 1, tożsame z wyposażeniem układu eksperymentalnego (patrz rys. 2). Model obwodu głównego składa się z trzech zasadniczych bloków: źródła energii, falownika napięcia oraz silnika synchronicznego. Model źródła energii opracowano wykorzystując schemat zastępczy źródła oparty na twierdzeniu Thevenina. Uwzględnia on impedancję źródła widzianą od strony jego zacisków. Falownik napięcia opiera się na układzie mostkowym sześciotranzystorowym. Przeciwnie równolegle do każdego tranzystora dołączono diodę zwrotną. Do utworzenia dokładnego modelu falownika napięcia, wyko-

rzyszano dostępne w bibliotece programu PSpice modele tranzystorów IGBT oraz modele diod.



Rys. 1. Schemat blokowy obwodu głównego oraz układu sterowania w PSpice

Przy budowie w programie PSpice modelu silnika IPM przyjęto następujące założenia:

- rezystancja uzwojenia silnika  $R_s$  jest stała,
- indukcyjność  $L_q$  jest stała,
- indukcyjność  $L_d$  jest stała,
- strumień wzbudzenia od magnesów trwałych  $\phi_f$  jest stały,
- opory tarcia w łożyskach  $B$  są pomijalnie małe,
- zjawisk termicznych związanych z nagrzewaniem elementów nie uwzględniano.

Zmianę indukcyjności w osi poprzecznej uwzględniono w układzie sterowania w modelu silnika dla stanu quasi-ustalonego.

Część elektryczną modelu silnika oparto na modelu obwodowym zbudowanym z wykorzystaniem równań (1) – (5), natomiast część mechaniczną na poniższym równaniu:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + T_L = T_e \quad (6)$$

gdzie:  $J$  – moment bezwładności układu napędowego,  $B$  – opory tarcia,  $T_L$  – moment obciążenia.

Dla sterowania silnikiem synchronicznym konieczna jest znajomość kąta położenia wirnika  $\theta$ . Ponadto przyjęto, że początkowy kąt jest równy zero, natomiast zmianę kąta wyznacza się całkując prędkość kątową silnika  $\omega$ , tj.:

$$\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (7)$$

Trakcyjny charakter obciążenia wynika z uwzględnienia oporów ruchu  $W$  [4] i jest funkcją wielu zmiennych. Wartość momentu obciążenia  $T_L$ , jak również zadany moment rozruchowy  $T_R$  (będący odpowiednikiem subiektywnej oceny i oddziaływania kierowcy na pedał przyspiesznika) są wyznaczone w modelu „obliczenia trakcyjne” (patrz rys. 2) w oparciu o parametry opisujące pojazd autonomiczny, założoną dynamikę rozruchu, profil trasy oraz aktualną prędkość. W modelu tym moment oporowy  $T_L$  jest wyznaczany z przedstawionej poniżej zależności:

$$T_L = \frac{W \cdot D_k}{2 \cdot M} \quad (8)$$

gdzie:  $W$  – opory trakcji,  $M$  – liczba silników,  $D_k$  – średnica koła.

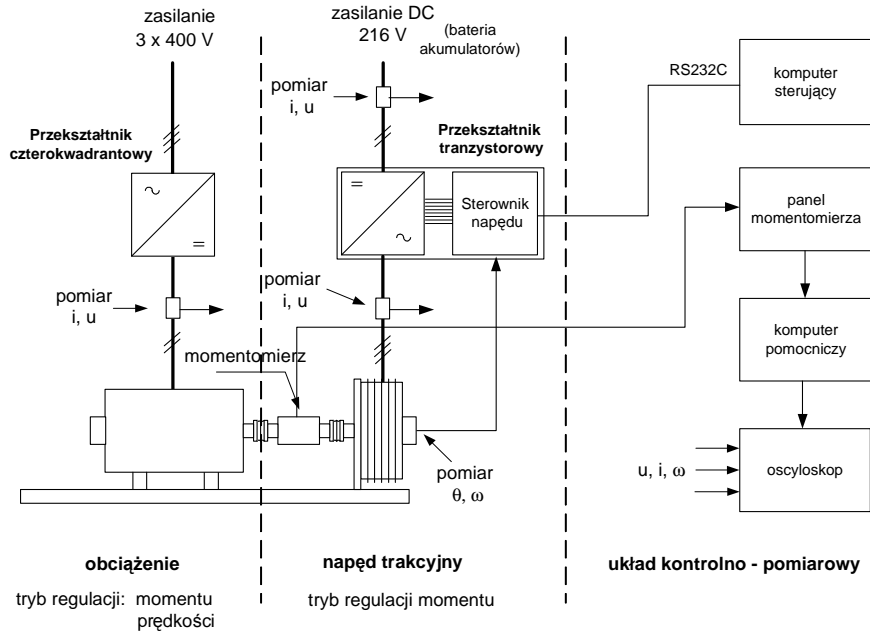
Analiza symulacyjna układu napędowego wymaga uwzględnienia zarówno modelu obwodu mocy, jak i modelu układu sterownia. Pełna konfiguracja napędu umożliwi obserwację zjawisk zachodzących w obwodzie głównym przy zastosowaniu sterowania pozwalającego na kształtowanie charakterystyki trakcyjnej pojazdu. Przy budowie obwodu sterowania wykorzystano algorytm w trybie regulacji momentu przedstawiony w [6], który rozszerzono m.in. o metodę maksymalizacji momentu, dostosowując go do sterowania silnikiem synchronicznym z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika. Przedstawiony na rys. 1 model układu sterowania jest modelem ciągłym, opartym na elementach analogowych, natomiast w układzie rzeczywistym sterowanie opiera się na układzie mikroprocesorowym. Przyjęto takie uproszczenie jako dopuszczalne, ponieważ praca obwodu głównego jest dyskretyzowana poprzez falownik pracujący z modulacją PWM. Sterowanie ciągłe w czasie rzeczywistym jest pewnym przybliżeniem, które jednak wykorzystuje analogiczne struktury sterowania jak algorytmy sterowania cyfrowego [7].

Istotnym elementem przedstawionego układu sterownia jest blok „kalkulatora trajektorii momentu”. W nim to wyznaczone są zadane wartości prądów  $i_q^*$  i  $i_d^*$  w oparciu o trajektorię maksymalizacji momentu.

Dodatkowo w modelu na rys. 1 wykorzystano blok transformaty odwrotnej Clarke’a-Parka oznaczony jako dq/qbc oraz model generatora sygnałów sterujących PWM.

#### 4. PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ

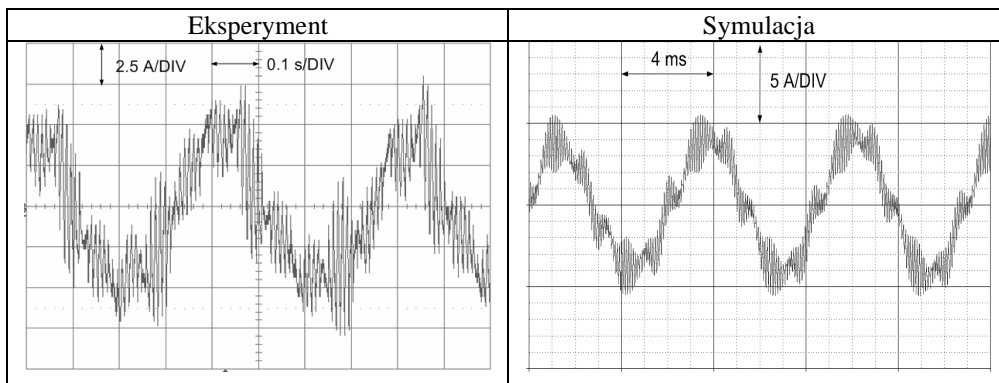
Dla oceny uzyskanych wyników z badań symulacyjnych wykorzystano zbudowane w Katedrze Trakcji Elektrycznej stanowisko laboratoryjne z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika. Schemat ogólny stanowiska przedstawiono na rys. 2. Wyposażenie stanowiska reprezentuje obwód główny pojazdu elektrycznego. Obwód mocy składa się z autonomicznego (elektrochemicznego) źródła energii (nie pokazany na rys. 2), falownika napięcia opartego na tranzystorach IGBT wraz ze sterownikiem DSP, silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, tzw. silnika momentowego. Obciążenie stanowi obcowzbudny silnik stałego prądu wraz z układem regulacji. Jako komputer nadrzędny w układzie sterowania wykorzystano komputer klasy PC. Pomiary prądów: baterii, silnika badanego i silnika DC wykonano z wykorzystaniem przetworników LEM, bezpośredniego pomiaru napięcia baterii dokonano na zaciskach wejściowych do falownika. Analogowy sygnał momentu obciążenia, jego znak, a także prędkość obrotową uzyskane z momentomierza wprowadzono do panelu pomiarowego.



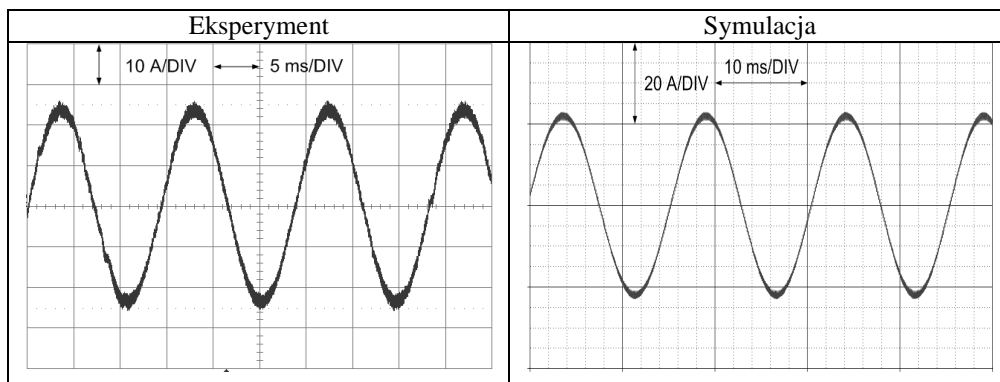
Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego z silnikiem IPM

Dla oceny jakości wyników symulacji i oceny możliwości wykorzystania modelowania i symulacji komputerowych na wstępnym etapie projektowania układu napędowego dla pojazdu autonomicznego, porównano charakterystyczne przebiegi w wybranych punktach obwodu głównego. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu przedstawiono tylko porównanie przebiegów prądu fazowego silnika (szczegółowo przedstawiono w [5]).

Na rys. 3 przedstawiono porównanie przebiegów prądu fazowego silnika dla biegu jałowego uzyskane na stanowisku eksperymentalnym oraz z symulacji pracy układu napędowego. Przebiegi na rys. 3 uzyskano dla  $n = 1450$  obr/min przy momencie obciążenia  $T_L = 1$  Nm. Natomiast na rys. 4 pokazano przebiegi prądu podczas obciążenia silnika momentem  $T_L = 25$  Nm, czemu odpowiada ustalona prędkość  $n = 430$  obr/min.



Rys. 3. Porównanie przebiegów prądu biegu jałowego  $T_e = 1$  Nm,  $n = 1450$  obr/min



Rys.4. Porównanie przebiegów prądu obciążenia dla  $T_e = 25 \text{ Nm}$ ,  $n = 430 \text{ obr/min}$

## 5. WNIOSKI

Sterowanie w trybie regulacji momentu sprowadza się do sterowania prądami, odpowiedzialnymi za generowany moment na wale silnika. Pokazane przebiegi prądu fazowego na rys. 3 i 4 wyróżniają się dużym podobieństwem, co wskazuje na poprawność opracowanych modeli obwodu głównego i układu sterowania. Pozwala to na wskazanie możliwości wykorzystania modelowania i symulacji komputerowych do szerokiej analizy własności trakcyjnych układu napędowego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. Identyczne przebiegi prądu fazowego silnika uzyskane w układzie eksperymentalnym i w wyniku symulacji dla różnych stanów pracy, pozwalają przypuszczać, że analiza własności trakcyjnych będzie wiarygodna, a wynikające z niej wnioski będą mogły stanowić ważne źródło informacji dla projektantów układów napędowych pojazdów autonomicznych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *ADVISOR Documentation. Advanced Vehicle Simulator*, National Renewable Energy Laboratory, April 30, 2002 (version 2002)
- [2] Brzózka J., Dorobczyński L.: *Programowanie w MATLAB*, Mikom, Warszawa 1998
- [3] Husain I.: *Electric and hybrid vehicles. Design fundamentals*, CRC Press, Boca Raton - London - New York - Washington D.C. 2003
- [4] Lanzendoerfer J., Szczepaniak C.: *Teoria ruchu samochodu*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980
- [5] Kamonciak A.: *Analiza energetyczna autonomicznego pojazdu małej mocy z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, rozprawa doktorska (przed recenzją)*, Politechnika Gdańska
- [6] Karwowski, K., Mizan M.: *DSP-controlled permanent-magnet motor drives for vehicle applications*, International Conference on Clean, Efficient and Safe Urban Transport CESURA'03 Gdańsk, 4 – 6 czerwiec 2003, CD-ROM,
- [7] Mizan M.: *An analog and DSP-based controllers for permanent magnet synchronous motor drivers*, 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC 2000 Kosice (CD-ROM).
- [8] Pillay P., Krishnan R.: *Modelling of Permanent magnet motor drives*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 35, No 4, November 1988, s. 537-541
- [9] Zimny P., Karwowski K.: *SPICE. Klucz do elektrotechniki*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996