ELEKTROTECHNIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ELECTRICAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-E/2011
ZESZYT 13
ROK 108
ISSUE 13
YEAR 108

LESZEK JARZĘBOWICZ, SŁAWOMIR JUDEK, KRZYSZTOF KARWOWSKI*
LECH LIPIŃSKI, MIROSŁAW MISZEWSKI**

KOMPLEKSOWA ANALIZA SYMULACYJNA UKŁADU NAPĘDOWEGO ZESPOŁU TRAKCYJNEGO

COMPREHENSIVE SIMULATION ANALYSIS OF TRACTION UNIT ELECTRIC DRIVE

Streszczenie

Omówiono metodykę kompleksowej analizy symulacyjnej napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego. Przedstawiono model opracowany w środowisku Matlab/Simulink odpowiadający układowi napędowemu elektrycznego zespołu trakcyjnego ED-74. Nowoczesny napęd tego pojazdu zawiera cztery silniki indukcyjne zasilane za pośrednictwem falowników napięcia. Omówiono strukturę i funkcjonowanie modelu. Zaprezentowano wybrane wyniki symulacji.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, modelowanie komputerowe, napęd elektryczny pojazdu

Abstract

The paper describes an approach to comprehensive analysis of traction electric drive. The drivetrain of ED-74 electric unit equipped with four inverter-fed induction motors was modeled in Matlab/Simulink. The model consists of functional blocks as: motors, inverters, drive controllers, filters. Structure and operation of the model was described. Chosen simulation results were presented and discussed. Tw o methods of modeling the inverter were presented. Complex method take int o account voltage modulation process. It's useful for observation of high frequency components of the waveforms. Second method, which needs much less computation time, assumes constant inverter voltage output during single modulation period. It's useful for simulation of long time cases. The comprehensive model enables complex analysis of performance of electric unit. Influence of drive parameters and controllers settings on unit performance can be tracked. Quantities which are difficult t o measure in target unit can be easily recorded via simulation. The model can be used t o choose drive control algorithm and adjustment of regulators' constants.

Keywords: electric traction, computer simulation, electric drivetrain

* Dr inż. Leszek Jarzębowicz, dr inż. Sławomir Judek, dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, prof. PG, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska.

** Dr inż. Lech Lipiński, dr inż. Mirosław Miszewski, Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA Holding.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Nowoczesne pojazdy sieciowe, a w szczególności elektryczne zespoły trakcyjne (EZT), charakteryzują się wzrostem pobieranej mocy z sieci trakcyjnej oraz wysoką złożonością energoelektronicznego napędu. Duża liczba urządzeń falownikowego układu napędowego, zaawansowane metody sterowania napędem i całym pojazdem oraz wysokie wymagania jakości regulacji i niezawodności pracy wymuszają szczegółową analizę pracy EZT. Dodatkowo parametry elektryczne zasilania trakcyjnego oraz napędu są wzajemnie powiązane i konieczne do analizy w szerokim spektrum częstotliwościowym [3, 7].

Kompleksowa analiza układu napędowego nowoczesnego EZT wymaga opracowania modeli odwzorowujących poszczególne komponenty napędu oraz zdefiniowania ich wzajemnych powiązań. Analizę zaprezentowano na przykładzie modelu układu napędowego elektrycznego zespołu trakcyjnego ED-74 [4, 5].

2. Układ napędowy zespołu trakcyjnego i jego parametry

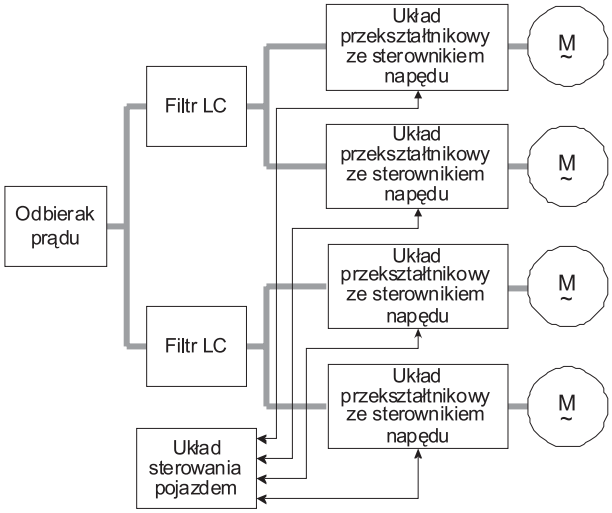
Rozpatrywany EZT typu ED-74 wyposażony jest w nowoczesny napęd przekształtnikowy prądu przemiennego z silnikami indukcyjnymi. Pojazd napędzany jest przez cztery silniki o łącznej mocy znamionowej wynoszącej 2 MW. Uproszczony schemat blokowy układu głównego pojazdu przedstawiono na rys. 1. Podstawowe dane pojazdu oraz jego napędu zawarto w tab. 1 [4, 5].

Każdy z silników trakcyjnych zasilany jest za pośrednictwem osobnego falownika tranzystorowego wykonanego w technologii IGBT. W falownikach wykorzystywana jest modulacja szerokości impulsów (PWM) [1]. W sterownikach napędów, opartych na procesorach sygnałowych, zaimplementowano wektorową regulację momentu wykorzystującą metodę RFOC [2, 8]. Metoda ta pozwala na odprzężone sterowanie momentu elektromagnetycznego oraz strumienia silnika poprzez regulację prądów stojana silnika i_D i i_Q wyrażonych w wirującym układzie współrzędnych związanym z wektorem strumienia wirnika silnika [8]. Pracę czterech napędów koordynuje układ sterowania pojazdem.

Charakterystykę trakcyjną EZT oraz zadawane wartości składowych prądów i_D i i_Q odpowiadających za strumień magnetyczny i generowany moment silnika dla pojedynczego napędu przedstawiono na rys. 2.

Podstawową charakterystykę trakcyjną (rys. 2) można podzielić na trzy obszary [7]. Podział ten wynika z zależności opisującej moment rozwijany przez silnik indukcyjny. Pierwszy przedział, to praca ze stałym momentem. Przy zwiększaniu prędkości (powyżej 0,3 p.u.) następuje przejście na pracę przy stałej mocy. Na odcinku charakterystyki pomiędzy 0,3 a 0,65 p.u. moment jest odwrotnie proporcjonalny do rozwijanej prędkości kątowej. Ostatni fragment charakterystyki uzyskiwany jest przy pracy ze stałym poślizgiem silnika, co wiąże się z ograniczeniem mocy napędu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 1. Układ napędowy EZT typu ED-74

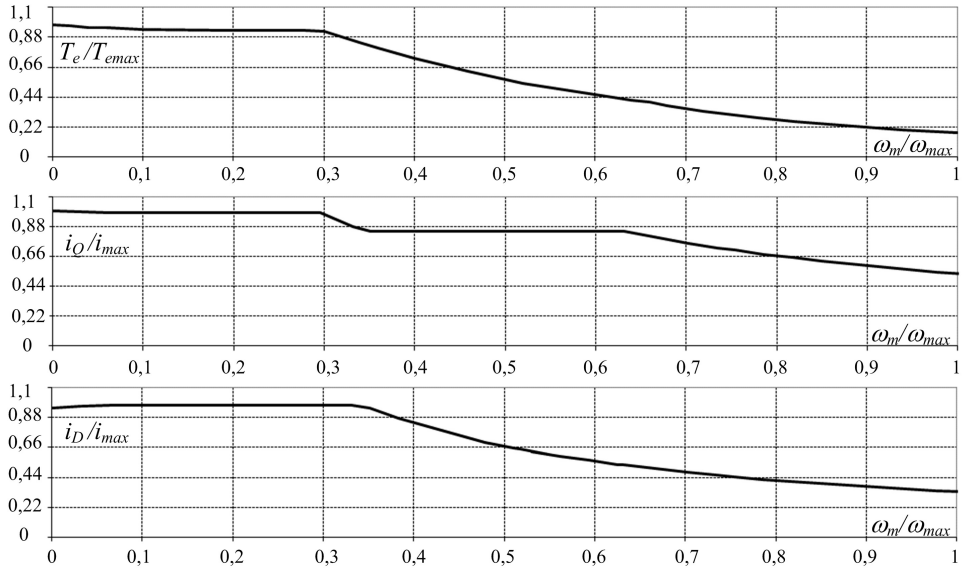
Fig. 1. Drivetrain of ED-74 electric unit

Tabela 1

Podstawowe dane EZT ED-74

Masa służbowa pojazdu	156 t
Prędkość eksploatacyjna pojazdu	160 km/h
Przyspieszenie pojazdu do prędkości 50 km/h	1 m/s^2
Moc znamionowa	2 MW
Liczba silników trakcyjnych	4
Maksymalny moment na wale silnika	4400 Nm
Maksymalna prędkość kątowa wirnika silnika	5200 obr/min
Maksymalny prąd wyjściowy falownika	250 A
Maksymalne napięcie wyjściowe falownika	2340 V

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 2. Charakterystyka trakcyjna napędu T_e oraz wartości zadane prądów i_D, i_Q w zależności od prędkości kątowej wirnika silnika ω_m (w odniesieniu do parametrów silnika)

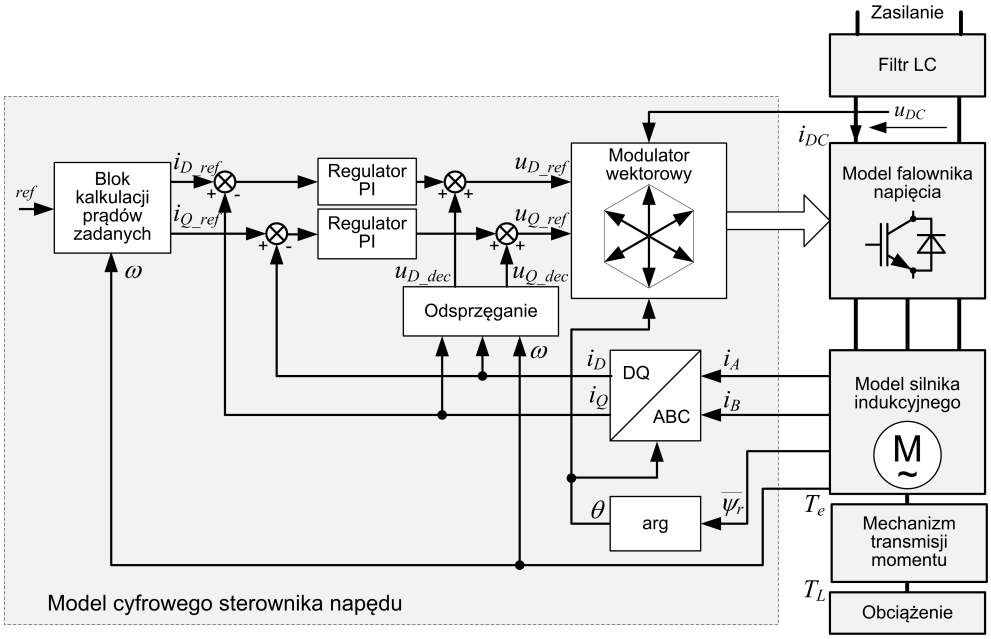
Fig. 2. Tractive effort diagram and current-velocity characteristics

3. Model matematyczny układu napędowego

Model opracowany w środowisku Matlab/Simulink ma strukturę modułową. Poszczególne moduły odwzorowują pracę: silników indukcyjnych, falowników tranzystorowych, sterowników cyfrowych napędów, filtrów wejściowych pojazdu typu Γ oraz podstacji zasilającej z siecią trakcyjną. W sterownikach napędów zaimplementowano algorytm sterowania według metody RFOC z regulatorami prądów typu PI. Uwzględniono współpracę napędu z mechanizmem transmisji momentu. Model sparametryzowano oraz przetestowano w zakresie poprawności działania. Ogólną strukturę modelu przedstawiono na rys. 3.

Funkcje realizowane przez bloki programowe zostały sparametryzowane z zastosowaniem stałych, dzięki czemu można zmieniać parametry pracy bez konieczności zagłębiania się w kolejne warstwy struktury modelu. Modyfikację wartości parametrów wykonuje się za pośrednictwem okna dialogowego programu Matlab/Simulink.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Ogólna struktura modelu symulacyjnego napędu przekształtnikowego

Fig. 3. Top-layer structure of inverter-fed drive model

3.1. Model silnika i mechanizmu transmisji momentu

W opisie analitycznym silnika zastosowano uproszczenia polegające na założeniu symetrii maszyny i skupienia uzwojeń oraz pominięciu: zjawiska histerezy, nasycenia magnetycznego, wyższych harmonicznych rozkładu przestrzennego pola w szczelinie powietrznej. Ponadto rezystancje uważa się za stałe, a odpowiednie indukcyjności za stałe lub zależne tylko od położenia.

Opis pracy silnika, oparty na równaniach we współrzędnych naturalnych, wymaga znajomości kąta położenia wirnika względem stojana. Z tego względu dokonuje się przekształcenia (transformacji) układu równań do ortogonalnego układu współrzędnych. W celu wprowadzenia zwięzłego opisu równań w nowym układzie współrzędnych wykorzystano zapis w postaci amplitud zespolonych i teorię tzw. wektorów przestrzennych [8]. Dodatkowo wszystkie parametry silnika związane z wirnikiem sprowadza się do obwodu stojana.

Wyboru nowego, ortogonalnego układu współrzędnych można dokonać na wiele sposobów. W literaturze utrwaliło się kilka z nich. Do najczęściej wykorzystywanych należą:

– układ współrzędnych nieruchomych dq,
– układ współrzędnych wirujących DQ.

Układ współrzędnych wirujących można powiązać z różnymi wielkościami, uzyskując tym samym różne postacie modelu matematycznego silnika. Najczęściej stosuje się orientację:

– względem strumienia stojana, tzw. SFOC (układ współrzędnych DQ wirujący z prędkością wirowania pola stojana),

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– względem strumienia wirnika, tzw. RFOC (układ współrzędnych DQ wirujący z prędkością wirowania pola wirnika),
– względem strumienia głównego maszyny, tzw. FOC (układ współrzędnych DQ wirujący z prędkością wirowania pola szczeliny powietrznej maszyny).

Ze względu na łatwość implementacji oraz na fakt, że do realizacji takiego rodzaju modelu wymagane są tylko dwie operacje całkowania, co znacznie skraca czas obliczeń, wybrano model matematyczny silnika trakcyjnego zapisany we współrzędnych stacjonarnych dq przy założeniu, że wielkościami wejściowymi są napięcia fazowe silnika, a wyjściowymi prądy fazowe silnika. Po uwzględnieniu powyższych założeń równania silnika zapisane za pomocą wektorów przestrzennych przedstawiają się następująco

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{v} + \mathbf{B}\mathbf{i} \tag{1}$$

gdzie:

$\mathbf{i} = [i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}]^T$,
$\mathbf{v} = [u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}]^T$,
A, **B** – macierze zależne od parametrów elektrycznego schematu zastępczego maszyny [8].

Uzupełnienie równań napięciowo-prądowych stanowią zależności wyrażające wartość momentu elektromagnetycznego generowanego przez silnik

$$T_e = \frac{2}{3} pL_m \left(i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr} \right) \tag{2}$$

gdzie:

L_m – indukcyjność główna silnika,
p – liczba par biegunów.

Dopełnieniem zależności (1) i (2) są równania prostego modelu mechanizmu transmisji momentu w postaci elementu sprężysto-tłumiącego łączącego silnik z zestawem kół

$$\begin{aligned} \frac{d^2\varphi_s}{dt^2} &= \frac{1}{J_s} T_e - \frac{1}{J_s} \left[d\left(\frac{d\varphi_s}{dt} - \frac{d\varphi_k}{dt} \right) + k\left(\varphi_s - \varphi_k \right) \right] \\ \frac{d^2\varphi_k}{dt^2} &= -\frac{1}{J_k} T_l + \frac{1}{J_k} \left[d\left(\frac{d\varphi_s}{dt} - \frac{d\varphi_k}{dt} \right) + k\left(\varphi_s - \varphi_k \right) \right] \end{aligned} \tag{3}$$

gdzie:

φ_s – kąt obrotu wirnika silnika,
φ_k – kąt obrotu zestawu kołowego,
T_e – moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik,
T_l – moment obciążenia,
J_s – moment bezwładności wirnika z uwzględnieniem przełożenia i obciążenia sprowadzony do wirnika silnika napędowego,
J_k – moment bezwładności zestawu kołowego napędzanego przez silnik,
d, k – odpowiednio tłumienie skrętne i sztywność skrętna osi pomiędzy masami wirującymi.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wielkościami wejściowymi modelu zaimplementowanego w środowisku Simulink są napięcia fazowe silnika u_A, u_B, u_C oraz parametry obwodowego modelu silnika. Wielkości wyjściowe modelu stanowią prądy fazowe pobierane przez silnik i_A, i_B, i_C, prędkość mechaniczna ω_m oraz składowe strumienia magnetycznego skojarzonego z wirnikiem odpowiednio ψ_{dr} i ψ_{qr}.

Dodatkowo wyprowadzono w celu umożliwienia ich obserwacji następujące wielkości:
– składowe strumienia magnetycznego skojarzonego z wirnikiem ψ_{dr} oraz ψ_{qr},
– składowe strumienia magnetycznego skojarzonego ze stojanem ψ_{ds} oraz ψ_{qs},
– moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik T_e,
– drogę kątową przebytą przez wirnik silnika φ_s.

3.2. Model sterownika cyfrowego oraz falownika

Wartości prądów zadawane są wg zależności przedstawionych na rys. 3 (blok kalkulacji prądów zadanych). Regulatory prądów wykonano jako proporcjonalno-całkujące (PI) z ograniczeniem całki oraz wartości wyjściowej. Regulacja prądów według metody RFOC odbywa się w układzie współrzędnych DQ związanym ze strumieniem magnetycznym ψ_r wirnika silnika. Oś D odpowiada kierunkowi i zwrotowi wektora pola magnetycznego wirnika.

Do wartości wyjściowych z regulatorów PI dodawane są napięcia obliczone przez blok odprzęgający tory regulacji. Zadane napięcia są transformowane do stacjonarnego układu współrzędnych. Transformacja uwzględnia możliwości realizacji zadanego wektora napięcia z wykorzystaniem bieżącej wartości napięcia wejściowego falownika i ogranicza moduł wektora wyjściowego. Wartości zadane napięć w układzie stacjonarnym doprowadzone są do wektorowego modulatora napięć.

Przewidziano dwa tryby pracy modelowanego falownika. W trybie uproszczonym modulacja napięcia wyjściowego nie jest realizowana. Wartość zadana napięć jest przekazywana na wyjście uproszczonego falownika i pozostaje stała przez okres modulacji. Brak odwzorowania procesów modulacyjnych pozwala na skrócenie czasu symulacji przez dobór relatywnie długiego kroku całkowania metody rozwiązywania numerycznego modelu.

Drugi tryb pracy falownika umożliwia odzwierciedlenie modulacji napięcia wyjściowego. Modulacja realizowana jest według algorytmu SVM (*Space Vector Modulation*) [1]. Założono idealne elementy energoelektroniczne – bez odwzorowania procesów przejściowych przy komutacji oraz spadków napięć na przyrządach półprzewodnikowych. Napięcia wyjściowe w modelu falownika wyrażone są, dla uproszczenia, jako wartości fazowe napięć silnika u_A, u_B, u_C.

W modelu sterownika odwzorowano dyskretną zmienność wartości, na których operują poszczególne podprogramy algorytmu sterowania napędem. Wykorzystano do tego podsystemy wyzwalane, tzw. *Triggered subsystems* programu Matlab/Simulink. Ich zawartość wywoływana jest przy wystąpieniu określonego zbocza sygnału wyzwalającego, a wartość wyjściowa zostaje zatrzaśnięta aż do kolejnego wyzwolenia. W ten sposób determinowane są chwile wywołania poszczególnych procedur programowych.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3.3. Model filtru wejściowego pojazdu i układu zasilania trakcyjnego

W pojeździe zainstalowane są dwa filtry wejściowe przekształtników. Filtry tego typu są filtrami pasywnymi LC o strukturze Γ. Na potrzeby symulacji zamodelowano układ filtru z uwzględnieniem rezystancji dławika

$$\frac{du_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_f}\left(i_p - i_{DC}\right) \tag{4}$$

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_f}\left(u_p - u_{DC} - R_f i_p\right) \tag{5}$$

gdzie:

u_{DC}	–	napięcie w obwodzie pośrednim falownika,
i_{DC}	–	prąd pobierany przez falownik,
u_p	–	napięcie zasilające pojazd (przed filtrem),
i_p	–	prąd pobierany z sieci,
R_f, L_f, C_f	–	odpowiednio rezystancja, indukcyjność i pojemność filtru.

Wybrano układ zasilania jednostronnego z podstacją trakcyjną zamodelowaną w uproszczony sposób w postaci źródła napięcia stałego i rezystancji wewnętrznej. Odcinek sieci trakcyjnej zamodelowano poprzez skupione elementy opisujące odpowiednio rezystancję i indukcyjność sieci. Model zasilania modyfikuje parametry (4) i (5).

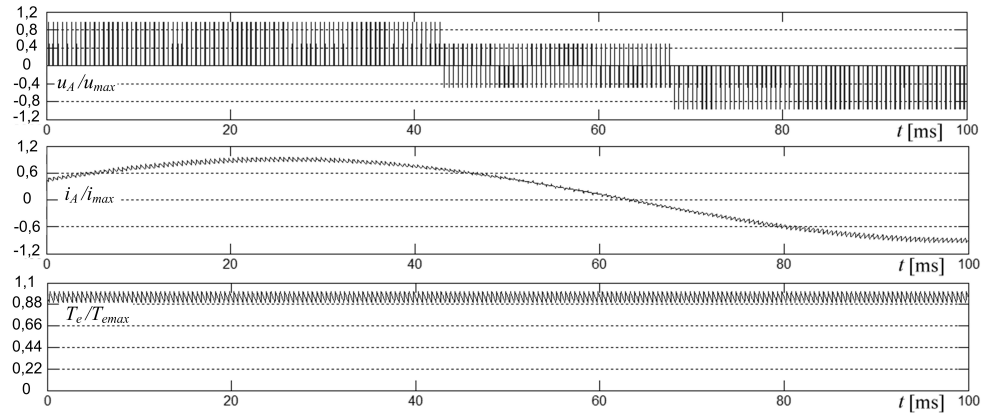
4. Badania symulacyjne układu napędowego

Przykładowe wyniki badań symulacyjnych obrazujące wybrane możliwości modelowania układu napędowego zamieszczono na rys. 4–6. Na rys. 4 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu oraz momentu elektromagnetycznego silnika dla różnych sposobów odzwierciedlenia pracy modulatora oraz falownika napięcia. Na rys. 4a zawarto wyniki uzyskane poprzez dokładne odwzorowanie modulacji napięcia wyjściowego falownika według metody SVM. W przebiegach momentu T_e oraz prądu i_A widoczne są pulsacje wynikające ze zmodulowanego napięcia u_A. Na rys. 4b wykreślono przebiegi uzyskane dla uproszczonego modelu falownika generującego uśrednioną wartość napięcia za cykl modulacji, co skraca około 50-krotnie czas obliczeń.

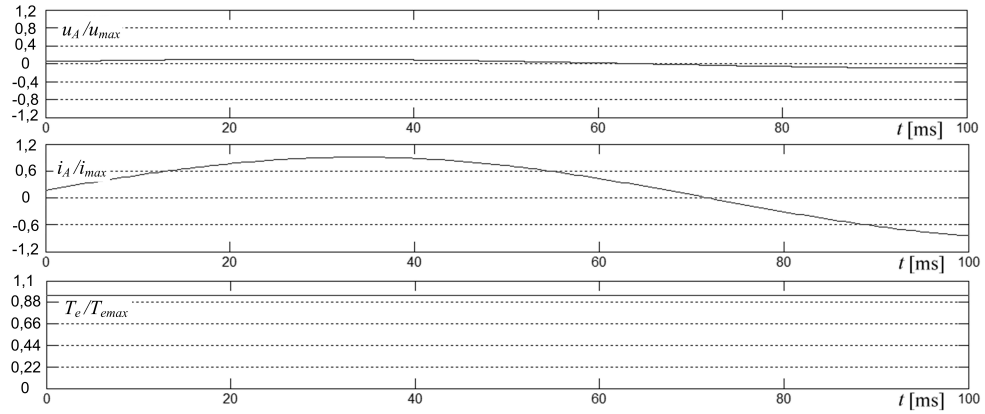
Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi wybranych wielkości związanych z silnikiem podczas rozruchu pojazdu. W chwili $t = 1$ s poprzez układ sterowania zadano wartość prądu i_D odpowiedzialną za strumień silnika Ψ_r. Dopiero po ustaleniu się strumienia ($t > 5$ s) rozpoczyna się regulacja prądu i_Q odpowiedzialnego za moment elektromagnetyczny T_e. Wraz ze zwiększaniem prędkości kątowej ω_m wartości zadane prądów zmieniają się według zależności przedstawionej na rys. 2. Odpowiednia regulacja prądów i_D, i_Q zapewnia realizację założonej charakterystyki trakcyjnej $T_e = f(\omega_m)$.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

a)



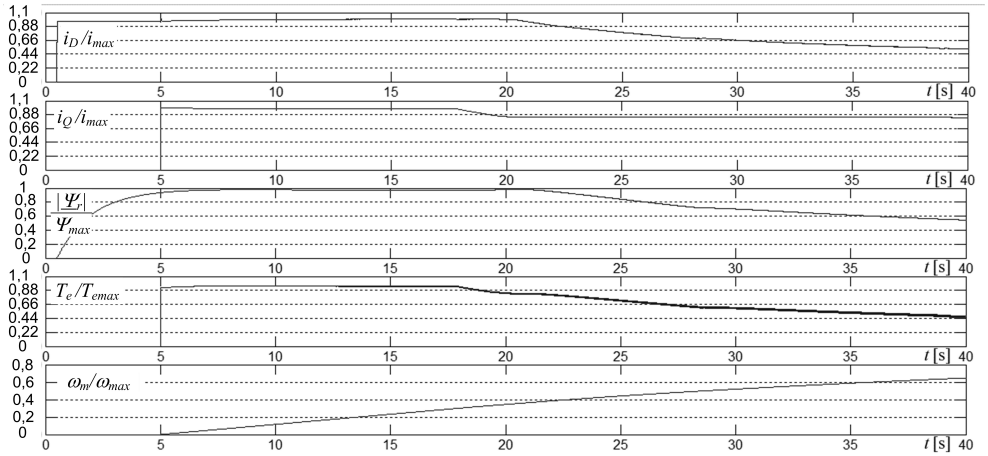
b)



Rys. 4. Przebiegi względnych wartości napięcia fazowego u_A, prądu fazowego i_A oraz momentu elektromagnetycznego T_e silnika dla dwóch sposobów modelowania pracy falownika: a) z odwzorowaniem modulacji napięcia falownika, b) z napięciem uśrednionym za okres modulacji

Fig. 4. Waveforms of per-unit values of phase voltage *uA*, phase current *iA* and electromagnetic torque *Te* acqured with the use of: a) accurate inverter model b) simplified inverter model

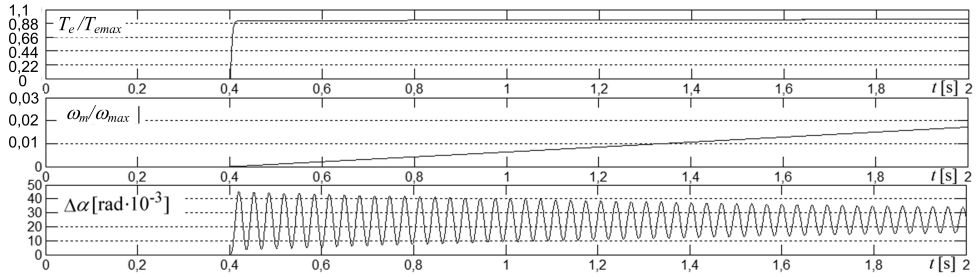
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Przebiegi wybranych względnych wielkości silnika podczas rozruchu pojazdu

Fig. 5. Waveforms of selected per-unit motor model quantities during accelerating

Na rysunku 6 wykreślono przebiegi wielkości mechanicznych dla skokowej zmiany zadanego momentu elektromagnetycznego (w chwili $t = 0{,}4$ s) – podobnie jak w przypadku rys. 5. Na wykresie przedstawiono m.in. przebieg różnicy kątowej Δα obliczonej przez moduł programowy związany z układem przeniesienia momentu napędowego silnika na koła napędne. Wartość Δα jest różnicą położeń kątowych wału silnika oraz kół napędnych sprowadzonych do wspólnego układu odniesienia. Szybka zmiana momentu elektromagnetycznego silnika wywołuje tłumione oscylacje w przebiegu Δα. Szerszą analizę zjawisk elektromechanicznych w pojeździe szynowym przedstawiono w [3].



Rys. 6. Przebiegi względnych wartości momentu elektromagnetycznego T_e i prędkości kątowej wirnika ω_m silnika oraz różnicy Δα sprowadzonych położeń kątowych wału silnika i kół napędnych

Fig. 6. Waveforms of per-unit values of electromagnetic torque *Te,* angular velocity *(OMEGA)e* and difference *(DELTA)(ALFA)* beetween angular position of motor shaft and wheels

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

5. Podsumowanie

Opracowany symulator umożliwia wygodną analizę wielkości niemierzalnych lub trudno mierzalnych, a także analizę wpływu parametrów programu sterowania oraz elementów układu napędowego na właściwości trakcyjne zespołu i układu zasilania elektrotrakcyjnego. W szczególności model symulacyjny stanowi praktyczne narzędzie wyboru struktury algorytmu sterującego i doboru parametrów regulatorów napędu. Uzyskane wyniki zweryfikowano z danymi technicznymi pojazdu ED-74.

Literatura

[1] Bose B., *Modern power electronics and AC drives*, Prentice Hall PTR, 2002.

[2] Lepka J., Stekl P., *3-Phase AC Induction Motor Vector Control Using DSP56F80x*, Motorola Inc., 2002.

[3] Lewandowski M., *Analiza zjawisk elektromechanicznych w szynowym pojeździe trakcyjnym z uwzględnieniem zmian współczynnika przyczepności kół napędowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.

[4] Lipiński L., Miszewski M., *Efektywność rekuperacji osiągana przez EZT-y serii ED74 na trasie Łódź–Warszawa*, Pojazdy Szynowe 1/2010.

[5] Lipiński L., Miszewski M., *Parametry trakcyjne elektrycznych zespołów trakcyjnych w trakcji wielokrotnej przy ograniczeniu mocy pobieranej z sieci trakcyjnej*, TTS 1-2/2010.

[6] Sitarz M., Sładkowski A., Chrudzik K., *Metody numeryczne w projektowaniu kół kolejowych zestawów kołowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.

[7] Szeląg A., *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.

[8] Trzynadlowski A.M., *Control of induction motors*, Academic Press, London 2001.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ