

Jan Anuszczyk, Dariusz Zając
Politechnika Łódzka, Łódź

ANALIZA PRACY NAPĘDU TRAKCYJNEGO Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM

ANALYSIS OF WORK OF AN INDUCTION MOTOR TRACTION DRIVE SYSTEM

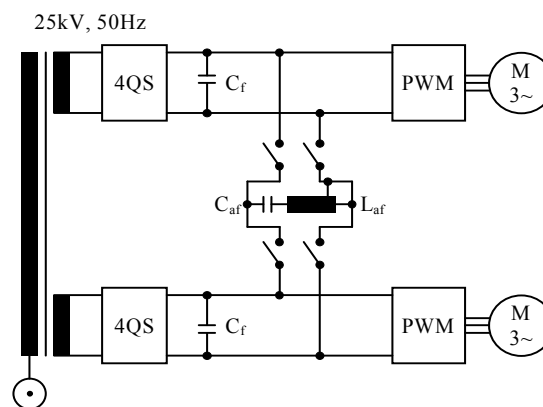
Abstract: In this paper the work of frequency converter voltage as well as the computer simulation of induction motor traction drive has been analysed. Work of the motor analysis was made for the railway traction supplied by the 25 kV, 50Hz alternating voltage. In order to eliminate higher voltage harmonics the used converters system provided output voltage of changeable amplitude, changeable frequency and current with sinusoidal shape. For analysed drive system Matlab/Simulink model was created. In result of simulation, the characteristics of torque, current and speed of the traction motor were studied.

1. Wstęp

Sterowanie układami napędowymi w nowoczesnych zespołach trakcyjnych jest realizowane za pomocą techniki mikro- procesorowej [3],[4]. Rozwój sterowanych półprzewodnikowych przyrządów mocy umożliwił zastosowanie silników prądu przemiennego w lokomotywach elektrycznych zasilanych napięciem stałym z sieci energetycznej lub z własnego źródła energii (pojazdy autonomiczne). Podstawą napędów trakcyjnych stały się silniki asynchroniczne klatkowe z falownikami napięcia. Zastosowanie falowników pozwoliło na budowę pojazdów wielosystemowych, które są zasilane z sieci prądu przemiennego i stałego. Na zelektryfikowanych liniach kolejowych Europy spotkać można cztery systemy zasilania: 3 kV i 1,5 kV prądu stałego oraz 15 kV o częstotliwości 16 2/3 Hz i 25 kV o częstotliwości 50 Hz. Współczesna technika, wykorzystująca tyrystory mocy GTO i silniki asynchroniczne, pozwala na zbudowanie wielosystemowej lokomotywy dużej mocy, jako lokomotywy czterosiowej z indywidualnym napędem indukcyjnym na każdą oś. Taka lokomotywa może być eksploatowana z prędkościami powyżej 200 km/h i ze względu na korzystną charakterystykę momentu może być używana zarówno do prowadzenia pociągów pasażerskich, jak również do prowadzenia ciężkich pociągów towarowych. Aktualnie na europejskich liniach kolejowych jeździ ponad 1000 sztuk lokomotyw wielosystemowych [1].

2. Charakterystyka pojazdu trakcyjnego

Uproszczony schemat obwodu elektrycznego pojazdu trakcyjnego przedstawia rys.1.

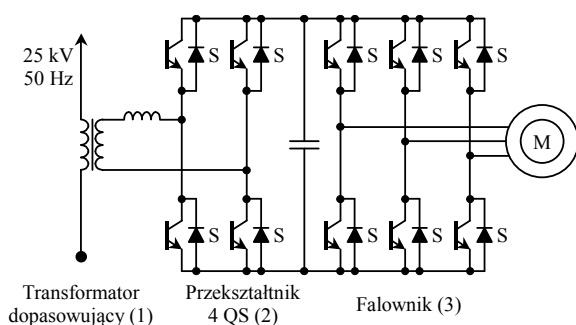


Rys. 1. Obwód elektryczny pojazdu trakcyjnego. Sekcja napędu jednego wózka dwuosowego; 4QS (Four-Quadrant Chopper) – czoper, PWM (Pulse Width Modulation) - falownik

Obwód główny pojazdu trakcyjnego posiada następujące cechy. Przy zasilaniu napięciem przemiennym o wartościach 25 kV lub 15 kV uzwojenia stojanów silników trakcyjnych są połączone w pojedynczą gwiazdę, natomiast przy zasilaniu prądem stałym 3 kV w podwójną gwiazdę. Przy zasilaniu lokomotywy z sieci prądu przemiennego napięcie jest zredukowane w transformatorze (1) do wartości wymaganej w obwodzie pośrednim. Następnie w przekształtnikach (2) prąd przemienny zostaje przekształcony na jednofazowy prąd stały. W falownikach (3) następuje zamiana jednofazowego prądu stałego na prąd trójfazowy o zmiennym napięciu i częstotliwości, którym są

zasilane silniki trakcyjne, rys. 2. Przy zasilaniu lokomotywy z sieci 3 kV napięcie jest dostarczane wprost do obwodu pośredniego i dzielone na: przekształtniki (2), które w tym przypadku pracują jako falowniki zasilające jedną z gwiazd uzwojenia stojanów silników trakcyjnych oraz falowniki (3), które zasilają drugą z gwiazd silników trakcyjnych.

Analizowany pojazd trakcyjny może pracować z napędem na cztery osi, a w skrajnym przypadku z napędem na jedną oś. Wówczas jedno-sekcyjny schemat zasilania indukcyjnego silnika trakcyjnego można przedstawić w postaci uproszczonej, jak na rys.2.



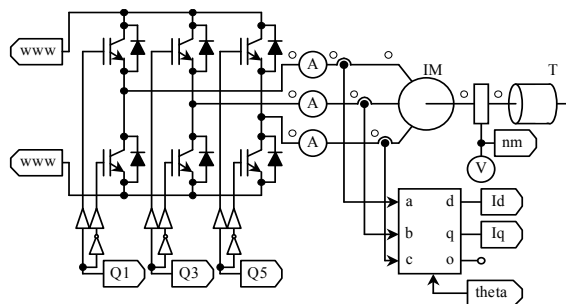
Rys. 2. Uproszczony schemat zasilania silnika trakcyjnego

Parametry rozważanego silnika trakcyjnego są następujące:

Moc znamionowa	1531 kW
Napięcie znam. (międzyfazowe)	2x1053 V
Prąd znamionowy	2x481 A
Liczba par biegunów	4
Prąd ciągły	2x663 A
Prędkość obrotowa: dla DC	1796 obr/min
dla AC	1670 obr/min

3. Układ przyjęty do symulacji pracy napędu

Wykorzystując środowisko programowe MATLAB [2], przeprowadzono komputerową symulację pracy rozważanego napędu, przyjmując do analizy układ, jak na rys.3. Układ zawiera elementy sterowania napędu oraz elementy trójfazowego falownika. Analizę przeprowadzono dla trakcji kolejowej zasilanej napięciem przemiennym 25 kV, 50 Hz. Pełny opis elementów elektronicznych oraz bloków układu symulacyjnego podano w pracy [5].



Rys. 3. Układ z falownikiem do symulacji pracy napędu

Skróty opis poszczególnych bloków układu symulacyjnego zawiera tablica 1.

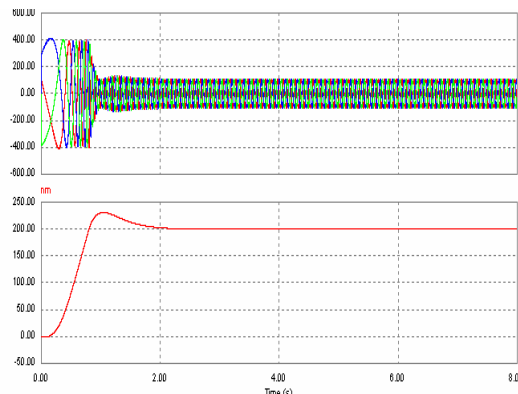
Tablica 1. Zestawienie wybranych bloków w modelu symulacyjnym silnika trakcyjnego

1. ABC2DQO	ABC1	– blok transformacji
2. COMP	COMP6	– komparator
3. COMP	COMP3	– komparator
4. COMP	COMP2	– komparator
5. DIVD	DIVD1	–dzielnik napięciowy
6. DQO2ABC	DQO1	– blok transformacji
7. FILTER_LP2	LP3	1, 5000, 0.7 – filtr wzmacniający
8. FILTER_LP2	LP2	1, 5000, 0.7 – filtr wzmacniający
9. FILTER_LP2	LP1	1, 5000, 0.7 – filtr wzmacniający
10. IB2	1, 0	– blok całkujący
11. GBT6	0	– łącznik IGBT
12. IGBT5	0	– łącznik IGBT
13. IGBT4	0	– łącznik IGBT
14. IGBT3	0	– łącznik IGBT
15. IGBT	IGBT2 0, 0	– łącznik IGBT
16. IGBT	IGBT1 0, 0	– łącznik IGBT
17. INDM_3S	IM 0.08, 0.002, 0.08, 0.0009, 0.070, 6, 2230	– silnik asynchroniczny
18. IP	Isa	– miernik prądu
19. IP	Isb	– miernik prądu
20. IP	Isc	– miernik prądu
21. ISEN	ISEN3	– czujnik pomiaru prądu
22. ISEN	ISEN2	– czujnik pomiaru prądu
23. ISEN	ISEN1	– czujnik pomiaru prądu
24. LIM	LIM1 - 400, 400	– ogranicznik
25. LIM	LIM8 - 0.98, 0.98	– ogranicznik
26. LIM	LIM7 - 0.98, 0.98	– ogranicznik
27. LIM	LIM6 - 0.98, 0.98	– ogranicznik
28. LIM	LIM4 -1.5, 1.5	– ogranicznik
29. LIM	LIM3 -1.5, 1.5	– ogranicznik
30. MLOAD_TMLOADT1	20, 0	– stały moment obrotowy silnika

31. NOTGATE – NOT3	–	bramka NIE
32. NOTGATE – NOT2	–	bramka NIE
33. NOTGATE - NOT1	–	bramka NIE
34. ONCTRL ON6	–	przełącznik, nastawnik
35. ONCTRL ON5	–	przełącznik, nastawnik
36. ONCTRL ON4	–	przełącznik, nastawnik
37. ONCTRL ON3	–	przełącznik, nastawnik
38. ONCTRL ON2	–	przełącznik, nastawnik
39. ONCTRL ON1	–	przełącznik, nastawnik
40. P P14	-1	
41. P RPM_to_MRS	0.1047187*3	– blok proporcjonalny
42. P Invt_Tao_r	1.2	
43. PI- PI1	10 , 0.0	– człon proporcjonalno-całkujący
44. PI- PI3	0.01, 0.01	– człon proporcjonalno-całkujący
45. PI- PI2	-0.5, 0.1	– człon proporcjonalno-całkujący
46. SUM2 SUM3	1	– sumator analogowy
47. SUM2 SUM6	1, -1	– sumator analogowy
48. SUM2 SUM4	1, -1	– sumator analogowy
49. SUM2P SUMP7	1 , 1	– sumator analogowy
50. VDC Vdc	1500	
51. VDC nm_cmd-	200	– źródło napięcia stałego
52. VDC Id_cmd-	100	– źródło napięcia stałego
53. VP n		– miernik napięcia
54. VTRIVTRI12	2 kHz , 0.5 , -1 V, 0 sec, 0 deg	– źródło napięcia trójkątnego przebiegu

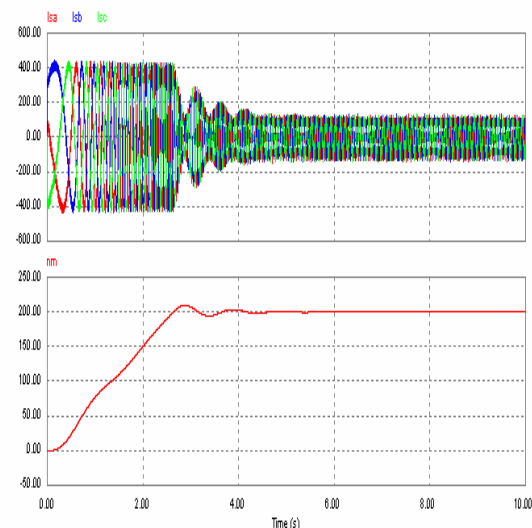
4. Analiza wyników badań

Przykładowe wyniki symulacji rozruchu oraz pracy rozpatrywanego napędu trakcyjnego podają rysunki 4, 5 i 6, 7. Analiza obejmuje przypadki pracy napędu, gdy napięcie wejściowe falownika jest mniejsze od napięcia wyjściowego.



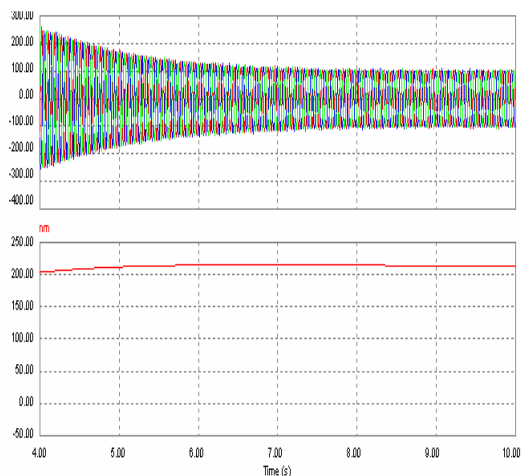
Rys. 4. Przebiegi prądów i prędkości obrotowej silnika trakcyjnego podczas rozruchu dla $M_{obc} = 680 \text{ Nm}$

Porównując podane przypadki rozruchu można zauważyć, że ze wzrostem momentu obciążenia wzrasta nieznacznie prąd silnika. Ponadto, już przy momencie $M_{ob} = 1400 \text{ Nm}$ ($M_N = 2230 \text{ Nm}$), dają się zauważyć 5% oscylacje prędkości obrotowej.



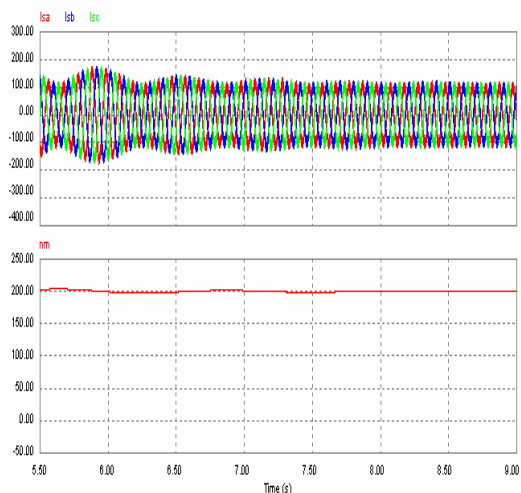
Rys. 5. Przebiegi prądów i prędkości obrotowej silnika trakcyjnego podczas rozruchu dla $M_{obc} = 1400 \text{ Nm}$

Rys.6 przedstawia przebiegi prądów fazowych oraz prędkości obrotowej przy niewielkim przyspieszaniu silnika i stałym momencie obciążenia. Przy wzroście prędkości silnika o około 6,5% ustalenie się prądu pobieranego z falownika następuje po czasie około 4 sekund.



Rys. 6. Przebiegi prądów i prędkości obrotowej silnika trakcyjnego podczas przyspieszania dla $M_{obc} = 680 \text{ Nm}$

Również utrzymywanie stałej prędkości obrotowej na trasie pociągu (rys.7), wymaga regulacji prądów fazowych.



Rys. 7. Przebiegi prądów i prędkości obrotowej silnika trakcyjnego podczas jazdy ustalonej dla $M_{obc} = M_N$

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej symulacji komputerowej napędu trakcyjnego z falownikiem PWM można zauważyć, że wraz ze wzrostem momentu obciążenia zwiększa się nieznacznie prąd obciążenia, a praca silnika asynchronicznego staje się niestabilna zwłaszcza podczas rozruchu lub pracy nawrotnej. Dla silników zasilanych z przekształtników wielkością użyteczną jest sinusoidalna składowa podstawowa napięcia. Wyższe harmoniczne napięcia wpływają niekorzystnie na pracę innych odbiorników

przylączonych do sieci energetycznej i powiększają straty. Zastosowany układ przekształtników ma na celu uzyskanie na wyjściu z falownika napięcia o zmiennej amplitudzie, o zmiennej częstotliwości oraz prądu pobieranego z sieci o kształcie sinusoidalnym. Stosując przekształtnik typu 4QS w obwodzie głównym lokomotywy stwierdzono, że można uzyskać prąd wejściowy zbliżony do sinusoidalnego.

6. Literatura

- [1]. Czarnecki M., Wolfram T.: *Dobór nowoczesnego taboru do warunków eksploatacji kolei w Polsce*. Materiały Konferencji nt. Nowe i modernizowane połączenia kolejowe w Polsce, 10 - 11 maj 2006, Warszawa. Wyd. SITK RP, 2006, ss.77-88.
- [2]. Mrozek B., Mrozek Z.: *Matlab i Simulink. Poradnik użytkownika*. Wyd. Helion, Gliwice, 2002.
- [3]. Nowacki Z.: *Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego*. Wyd. PWN Warszawa, 1991.
- [4]. Salam.Z., Goodman C. J.: *Compensation of fluctuating DC link voltage for traction inverter drive*. Power Electronics and Variable Speed Drives, 23-25 September 1996, Conference Publication, No. 429, IEE, 1996, pp. 390-395.
- [5]. Zajac D.: *Analiza przekształtnika 4QS w obwodzie głównym lokomotywy*. Praca dyplomowa, Zakład Trakcji Elektrycznej PW, 2005 (opiekun M. Lewandowski).

Autorzy

Jan Anuszczyk, prof. PŁ jest zatrudniony w Zespole Trakcji Elektrycznej w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki.

Adres: ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź.
E-mail: jan.anuszczyk@p.lodz.pl

Dariusz Zajac, mgr inż. jest doktorantem w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki.

Adres: ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź.
E-mail: dzajac@op.pl