

Lech Lipiński

Pojazdu Szynowe PESA Bydgoszcz SA, Bydgoszcz

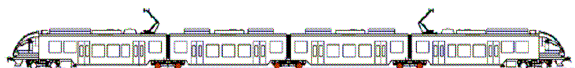
## WYKORZYSTANIE METOD SYMULACJI DO ANALIZY PRACY I DOBORU NASTAW REGULATORÓW TRAKCYJNYCH NAPĘDÓW ASYNCHRONICZNYCH

### APPLYING SIMULATION MODELS FOR OPERATION ANALYSIS AND SELECTION OF CONTROLLER SETTINGS IN TRACTION DRIVES WITH INDUCTION MOTORS

**Abstract:** In this paper, the simulation model of a traction drive with induction motors is presented. This model may be used for selecting settings of controllers applied in such a drive. The model makes it possible to make use of the real values of the drive parameters that were obtained during the type test of the drive and their verification by comparison of simulated transients with those occurring in real drives. Additionally, the simulation model makes it possible to apply parameters of the real track on which the analysed vehicle is operated as well as the calculation of energy consumption also taking into account of regenerative braking. The minimization of energy consumption may be performed with the help of the presented simulation model too. All considerations were made on basis of real traction motor ratings making use of the parameters of the Warszawa Wschodnia – Łódź Fabryczna track.

#### 1. Wstęp

W artykule przedstawiono metody symulacji do analizy pracy i doboru nastaw regulatorów trakcyjnych napędów asynchronicznych. W obecnych czasach metody symulacji stały się jedną z powszechnie akceptowanych metod obliczeniowych. Symulacje są chętnie stosowane w praktyce, gdyż uzyskane wyniki umożliwiają w bezpośredni sposób ocenę analizowanych rozwiązań. Na przykładzie modelu symulacyjnego pokazano sposób oszacowania oszczędności energii, zużywanej przez pojazd trakcyjny, uzyskanych dzięki minimalizacji strat w napędzie trakcyjnym. Rozważania zilustrowano analizą rzeczywistego przejazdu elektrycznego zespołu trakcyjnego (EZT-a) ED74 (rys. 1) na trasie Warszawa - Łódź i Łódź – Warszawa.



Rys. 1. Czterowagonowy elektryczny zespół trakcyjny (EZT), wykorzystujący wózki Jacobsa

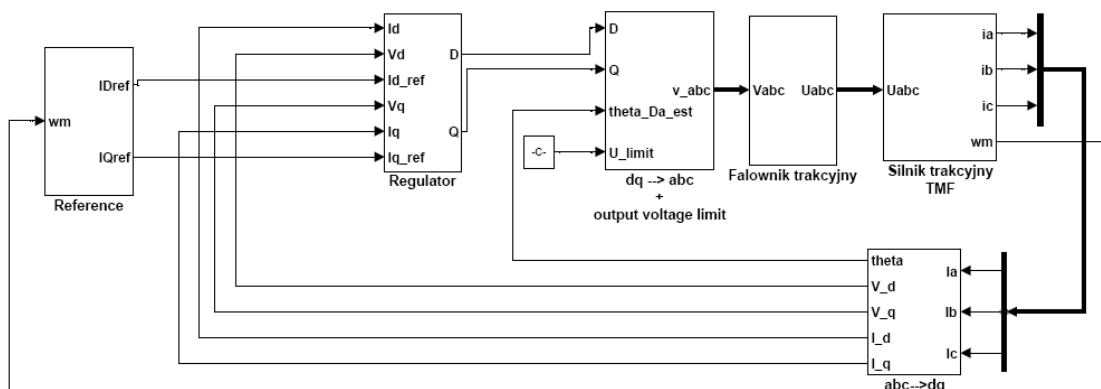
#### 2. Model symulacyjny napędu trakcyjnego

Przyjęty do badań model symulacyjny pokazano na rys. 2. Był on opisany w [1, 2]. Jest to model wykorzystujący metodę RFOC, która jest najczęściej, obok metody DSC, wykorzystywana w napędach trakcyjnych [6]. Model do symulacji zrealizowano w środowisku Ma-

tlab/Simulink®. Podstawowe parametry silnika trakcyjnego, przyjętego do symulacji, zestawiono w tabeli 1 [5].

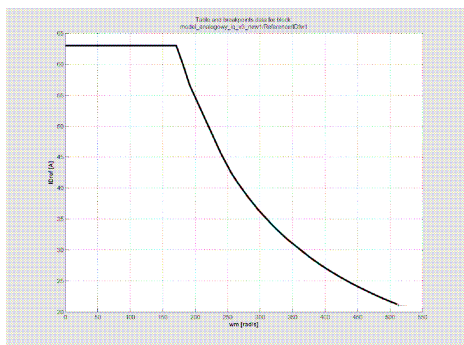
Tabela. 1 Ogólne dane techniczne silnika

Lp.	Wielkość	Wartość
1.	Moc znamionowa silnika	500 kW
2.	Znamionowa prędkość obrotowa	1736 obr/min
3.	Poślizg znamionowy	0,91 %
4.	Znamionowe napięcie silnika	2 340 V
5.	Znamionowe napięcie w sieci trakcyjnej	3 000 V DC
6.	Znamionowy współczynnik mocy	0,90
7.	Znamionowy prąd stojana	145,3 A
8.	Znamionowa częstotliwość stojana	58,4 Hz
9.	Liczba biegunów	4
10.	Rezystancja uzwojenia stojana (20 °C)	0,1256 Ω
11.	Rezystancja uzwojenia stojana (130 °C)	0,1798 Ω
12.	Reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana	0,99125 Ω
13.	Reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika	0,54643 Ω
14.	Reaktancja magnesująca	31,292 Ω
15.	Indukcyjność wzajemna	0,085279 H
16.	Sprawność	94,3%

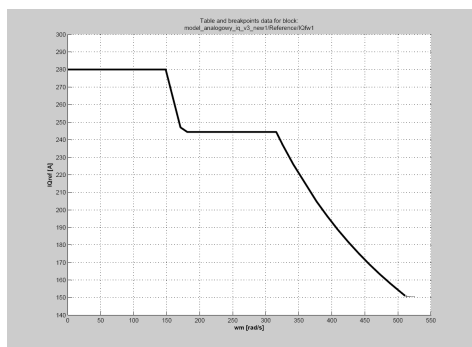


Rys. 2. Model symulacyjny napędu trakcyjnego wykorzystujący RFOC, przyjęty do badań

Do bloku *reference* (rys. 2) zostały wprowadzone wartości maksymalne prądów  $i_D$  i  $i_Q$  jako funkcje prędkości kątowej silnika (rys. 3 oraz rys. 4).



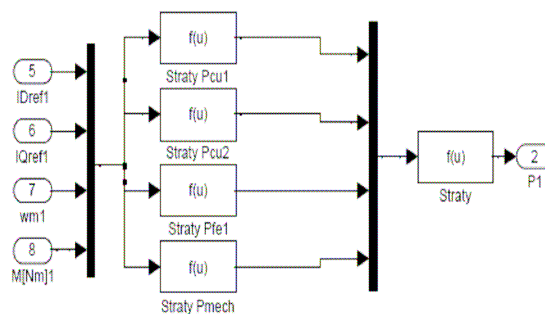
Rys. 3. Charakterystyka wartości maksymalnej prądu  $i_D$  wpisana do bloku regulatora



Rys. 4. Charakterystyka maksymalnej wartości prądu  $i_Q$  wpisana do bloku regulatora

W zależności od prędkości  $\omega$  blok zadawania wartości prądów  $i_D$  i  $i_Q$  przekazuje do regulatora odpowiednie wartości tego prądu. W bloku *regulator* zastosowano regulatory typu PI o oddzielnych nastawach dla prądu  $i_D$  oraz  $i_Q$ . Dla uproszczenia modelu i przyspieszenia symulacji falownik trakcyjny został ustawiony na stałą częstotliwość PWM równą 2 kHz. Jest to czę-

stotliwość znacznie wyższa niż spotykana w praktyce częstotliwość PWM dwupoziomych falowników trakcyjnych zasilanych napięciem stałym 3 kV. Zwykle nie przekracza ona 400 Hz. Ze względu na wysoką częstotliwość PWM do obliczania strat w silniku w bloku modelu symulacyjnego, przedstawionym na rys. 5, można zastosować wzory, które stosuje się przy zasilaniu sinusoidalnym silnika.



Rys. 5. Blok do obliczania strat w silniku

Jako obciążenie silnika trakcyjnego przyjęto moment oporowy wynikający z siły oporów ruchu EZT-a

$$F_o = 2,54 + \frac{1}{1880} v^2 \quad [\text{kN}], \quad (1)$$

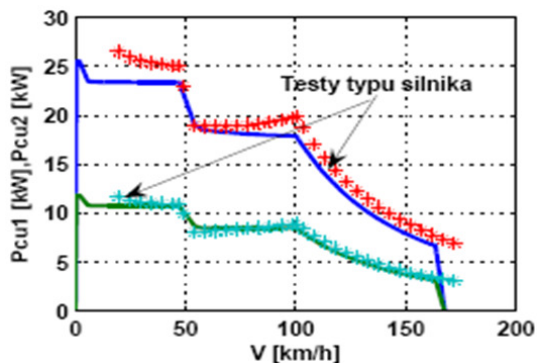
w którym  $v$  oznacza prędkość pojazdu w km/h, a zastępczy moment bezwładności  $J$ , odpowiadający masie pojazdu, wyznaczono ze wzoru

$$J = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{v}{\omega}, \quad (2)$$

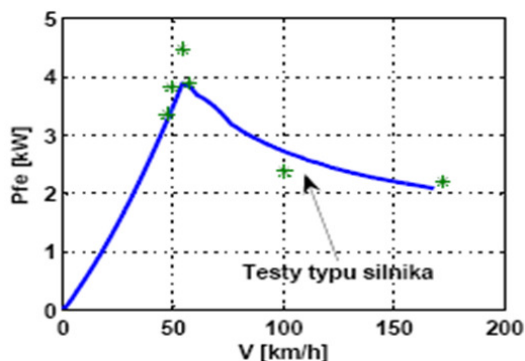
gdzie  $m$  – masa pojazdu w kg,  $n$  – liczba silników napędowych,  $\omega$  – prędkość kątowa silników w rad/s, odpowiadająca prędkości liniowej pojazdu  $v$ .

### 3. Porównanie modelu z rzeczywistym silnikiem trakcyjnym

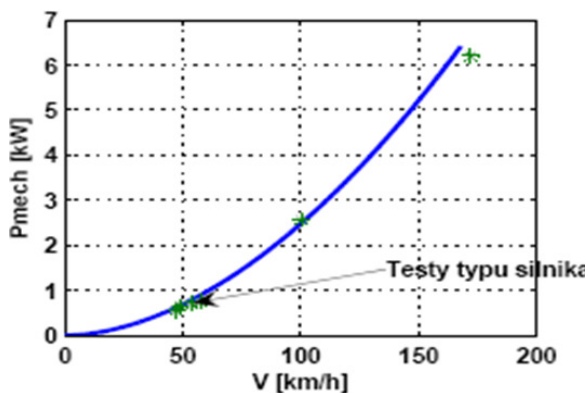
W modelu przyjętym do symulacji porównano wszystkie parametry z parametrami występującymi w rzeczywistym napędzie, uzyskanymi w trakcie próby typu silnika trakcyjnego (rys. 6 ÷ 9). Uzyskano dużą zgodność wyników symulacji z wynikami uzyskanymi z badań. Niezbyt ciągły, schodkowy przebieg uzyskanych charakterystyk wynika z przyjętej dla analizowanego napędu charakterystyki trakcyjnej pojazdu [5].



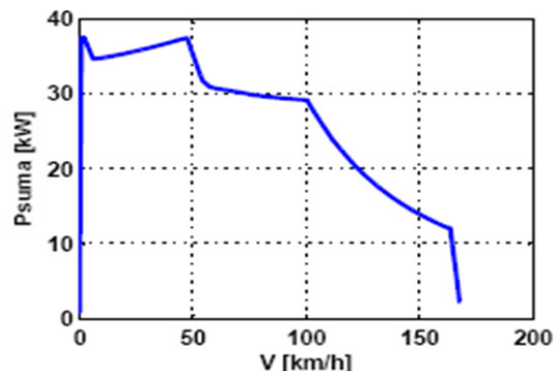
Rys. 6. Straty w miedzi silnika z obliczeń i prób



Rys. 7. Straty w żelazie silnika z obliczeń i prób



Rys. 8. Straty mechaniczne silnika z obliczeń i prób



Rys. 9. Straty wypadkowe silnika z obliczeń i prób

### 4. Analiza rzeczywistego przejazdu EZT-a

Do analizy wykorzystano rzeczywiste parametry przejazdu EZT-a na trasie Warszawa – Łódź i Łódź – Warszawa. Na podstawie danych zapisanych w rejestratorze zdarzeń oraz wskazań liczników energii pobieranej z sieci trakcyjnej, zamontowanych na pojazdach, można było wyznaczyć interesujące nas parametry. Parametry rzeczywistego przejazdu zapisane przez rejestrator zdarzeń pojazdu pokazano na rys. 10.

EZT-y na tej trasie kursowały w tzw. trójce podwójnej. Całkowita długość trasy wyniosła 138,91 km, a planowy czas przejazdu 1 h 45 min. Odległości między stacjami wynoszą od 3 km do 40 km. Maksymalna prędkość na trasie jest równa 130 km/h. Średnie zużycie energii elektrycznej przez pojazd na tej trasie, wyniosło  $E_{av} = 635$  kWh.

Pierwszy krok to analiza danych zebranych przez rejestrator zdarzeń pojazdu, a w szczególności wartości: zadanej siły trakcyjnej i momentu trakcyjnego, rozwijanego przez napęd. Dla wybranych częstości występowania momentów zadanych oraz prędkości obliczono straty oraz przeanalizowano możliwości do optymalizacji za pomocą jednej z metod optymalizacji [3, 4]. W badaniach przedstawionych w tym artykule zastosowano metodę bezpośrednią, wykorzystującą model silnika. Dzięki procesowi optymalizacji otrzymujemy wartości optymalne prądów  $I_D$  i  $I_Q$  oraz informację o oszczędności w zużyciu energii trakcyjnej na danej trasie. Wybrane parametry należy wprowadzić do modelu symulacyjnego. Nie da to w efekcie rzeczywistych wartości strat, gdyż model nie uwzględnia wszystkich elementów generujących straty.



Rys. 10. Przykład parametrów rzeczywistego przejazdu na trasie Łódź – Warszawa z dnia 16.01.2009 r. zarejestrowany za pomocą rejestratora zdarzeń pojazdu

Na podstawie analizy zarejestrowanych danych można wyciągnąć wniosek, że zadawanie siły trakcyjnej jest znacznie poniżej możliwości trakcyjnych, jakie posiada pojazd (rys. 10). Sytuacja taka może wynikać z tego, że pojazd na tej trasie porusza się w trakcji wielokrotnej i aby nie dochodziło do wyłączeń podstacji trakcyjnych, siła zadawana była zmniejszana przez maszynistów. Widać bardzo wyraźnie, że napęd trakcyjny pojazdu pracuje zwykle poniżej momentu nominalnego w każdej strefie charakterystyki trakcyjnej.

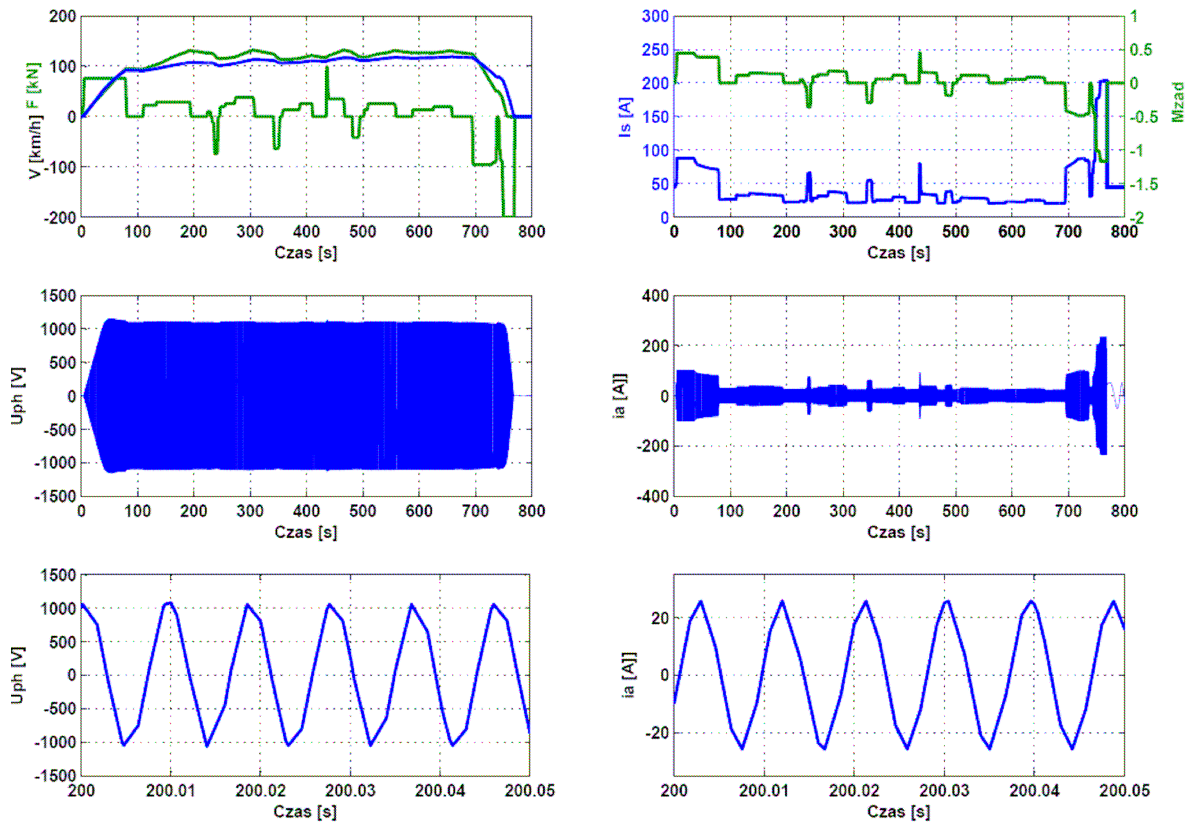
Na wykresie widać również impulsowe zadawanie siły trakcyjnej. To zjawisko wpływa niekorzystnie na pobór mocy i straty generowane przez napęd trakcyjny, gdyż przy takim sposobie zadawania siły trakcyjnej straty są większe niżby to wynikało z efektów działania siły trakcyjnej, czyli jej wartości średniej (straty są proporcjonalne w przybliżeniu do pierwiastka wartości średniej z kwadratów wartości siły, czyli do wartości RMS). Przyjęty do analizy model pozwala na symulowanie dowolnych przejazdów. Jeżeli jako wielkość wejściową przyjąć wartość zadaną siły trakcyjnej, to uzyskuje się dużą zgodność z rzeczywistymi parametrami przejazdu. Umożliwia to, np. precyzyjny dobór nastaw regulatorów dobranych wstępnie z pomocą kryterium modułowego i kryterium symetrii. Oprócz zmiennych globalnych pojazdu, takich jak prędkość, czy siła trakcyjna, model umożliwia na przykład badanie chwilowych wartości napięcia i prądu stojana

silnika trakcyjnego (rys. 14). Zakłada się, że po uwzględnieniu rzeczywistej częstotliwości PWM w przekształtnikach trakcyjnych możliwe będzie badanie spektrum harmonicznych generowanych przez pojazd.

### 5. Możliwości uzyskania oszczędności energii elektrycznej przez EZT

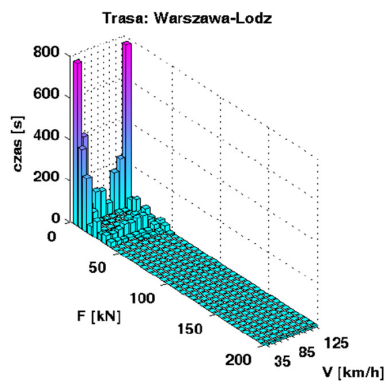
Potencjalne możliwości oszczędzania energii występują przy zadawaniu małych wartości sił trakcyjnych [3, 4]. Jeżeli przeanalizujemy dokładnie częstość zadawania sił trakcyjnych dla obu kierunków jazdy (rys. 11 a i b), to można zauważyć, że małe wartości sił trakcyjnych występują z dużą częstością dla małych prędkości, do 35 km/h, oraz dla dużych prędkości, wynoszących 125 km/h. Rejestrator zdarzeń rejestruje dane, co jedną sekundę. Zatem częstość występowania poszczególnych wartości sił trakcyjnych jest równocześnie równa czasowi jazdy z daną siłą trakcyjną. Szczegółowej analizie poddano następujące wartości sił trakcyjnych i częstości ich występowania:

- dla trasy Łódź – Warszawa:
  1.  $v < 35 \text{ km/h}$ ,  $F < 5 \text{ kN}$ , czyli dla  $M < 0,02M_n$  – częstość wynosi 942,
  2.  $v < 125 \text{ km/h}$ ,  $F < 5 \text{ kN}$ , czyli dla  $M < 0,07M_n$  – częstość wynosi 1418.
- dla trasy Warszawa – Łódź:
  1.  $v < 35 \text{ km/h}$ ,  $F < 5 \text{ kN}$ , czyli dla  $M < 0,02M_n$  – częstość wynosi 761,
  2.  $v < 125 \text{ km/h}$ ,  $F < 5 \text{ kN}$ , czyli dla  $M < 0,07M_n$  – częstość wynosi 754.

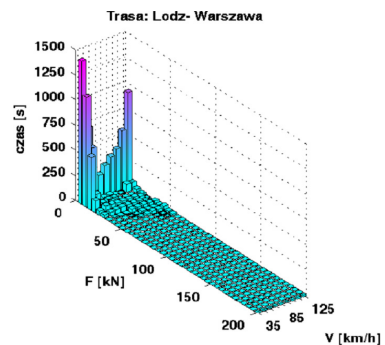


Rys. 11. Wyniki symulacji przejazdu pojazdu ED74 na trasie Skierniewice – Żyrardów w dniu 13.02.2009 r

a)

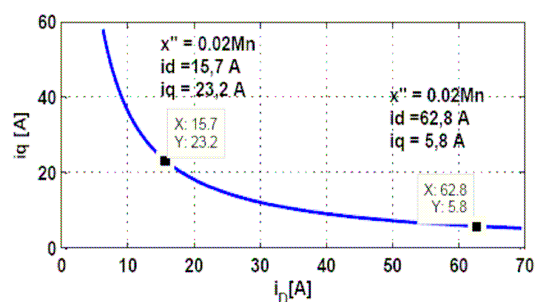


b)

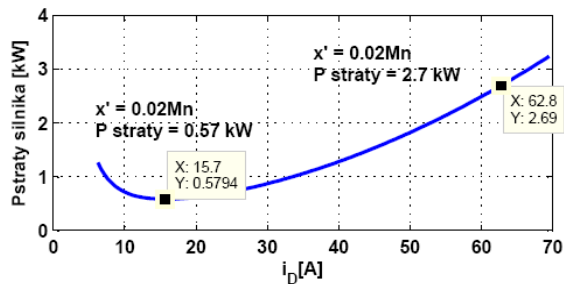


Rys. 12. Częstość występowania zadawanej wartości siły trakcyjnej

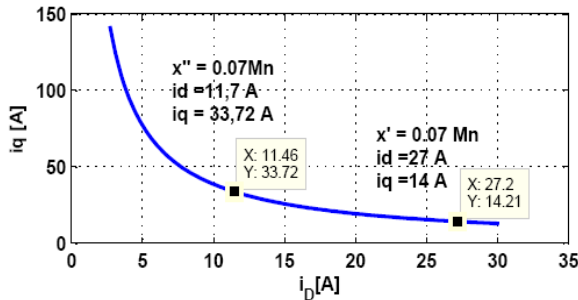
Jeżeli dla określonych wartości momentu i prędkości wstawić do modelu silnika (rys. 2) optymalne wartości prądu  $i_D$  i  $i_Q$ , to można obliczyć straty w nowych warunkach pracy. Biorąc po uwagę częstość występowania takich punktów pracy na analizowanej trasie, można obliczyć oszczędność energii dla każdego z tych punktów, a następnie oszczędności energii na całej analizowanej trasie. Jeżeli założymy, że dany pojazd przebędzie trasę Warszawa-Łódź cztery razy dziennie, to możemy oszacować oszczędności energii przez cały okres eksploatacji pojazdu, czyli przez 30 lat.



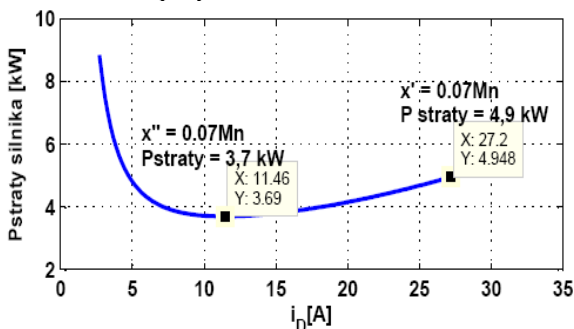
Rys. 13. Obliczone wartości zadane prądów  $i_D$  i  $i_Q$  dla regulatora dla momentu zadanego  $M = 0,02 M_n$  przy  $v = 35 \text{ km/h}$



Rys. 14. Obliczone wartości strat dla momentu zadanego  $M = 0,02 M_n$  przy  $v = 35$  km/h



Rys. 15. Obliczone wartości zadane prądów  $i_D$  i  $i_Q$  dla regulatora dla momentu zadanego  $M = 0,07 M_n$  przy  $v = 125$  km/h



Rys. 16. Obliczone wartości strat dla momentu zadanego  $M = 0,07 M_n$  przy  $v = 125$  km/h

Na rys. 13 oraz rys. 14 przedstawiono obliczenia dla prędkości  $v = 35$  km/h. Wartość prądu  $i_D$  została obniżona z 63 A (punkt oznaczony jako  $x'$ ) do wartości  $i_D = 16,6$  A (punkt oznaczony jako  $x''$ ). Dla utrzymania niezmięionej wartości momentu elektromagnetycznego zmieniły się równocześnie wartości prądu  $i_Q$ . Prąd ten wzrósł z wartości 6 A do 22,7 A. Dzięki takiej regulacji uzyskano jednak redukcję strat mocy w silniku z wartości  $\Delta P' = 3$  kW do wartości  $\Delta P'' = 0,65$  kW. Po optymalizacji przy prędkości  $v = 35$  km/h i obciążeniu  $M = 0,02 M_n$  udało się zredukować wartość strat o 78%. Podobne wyniki można uzyskać przy prędkości  $v = 125$  km/h i obciążeniu  $M = 0,07 M_n$  (rys. 15 i 16). Straty mocy zredukowano w tym przypadku o 23%. Przeprowadzone obliczenia uzasadniają zastosowania na analizowanej trasie

algorytmów optymalizujących zużycie energii. Obliczenia optymalizacyjne w rzeczywistym napędzie można zautomatyzować, stosując dodatkowe regulatory ekstremalne (szukające) lub wykorzystujące technikę *fuzzy logic*.

## 6. Wnioski

Środowisko Matlab/Simulink® można wykorzystać do tworzenia modeli napędów elektrycznych, w tym napędów trakcyjnych. Oprócz wyznaczania typowych przebiegów dynamicznych napędu model taki umożliwia określenie strat w układzie napędowym, jak również optymalizację energetyczną układu, tzn. wyznaczanie punktów pracy charakteryzujących się najmniejszymi stratami.

## 7. Literatura

- [1]. Jarzębowski L., Judek S., Karwowski K., Lipiński L., Miszewski M.: *Kompleksowa analiza symulacyjna układu napędowego zespołu trakcyjnego*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej „Technical Transactions Electrical Engineering” 1-E/2010, Zeszyt 13, Rok 108, ss.121-131.
- [2]. Judek S., Karwowski K., Lipiński L., Miszewski M.: *Modelowanie i symulacja napędów elektrycznych kolejowych pojazdów trakcyjnych z silnikami indukcyjnymi*. Pojazdy Szynowe nr 3/2010, ss. 25-29.
- [3]. Lipiński L.: *Praktyczne metody regulacji trakcyjnych silników indukcyjnych optymalne pod względem energetycznym*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 78, 2007, wyd. BOBRME Komel, ss. 109-114.
- [4]. Lipiński L., Miszewski M.: *Ocena współczynnika mocy silnika jako parametru optymalizacyjnego w skalarnych napędach asynchronicznych, optymalnych pod względem energetycznym*. KOMEL – Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 90/2011, ss. 45-50.
- [5]. Lipiński L., Miszewski M.: *Performance of EMUs in multiple configuration with limitation on power taken from catenary [in] MODERN ELECTRIC TRACTION. VEHICLES*. Karwowski K., Szlag A. (editors), Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering, Gdańsk 2009, pp. 13-26.
- [6]. Steimel A.: *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. Basics and Practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag München 2008.

## Autor

mgr inż. Lech Lipiński  
e-mail: lech.lipinski@pesa.pl  
Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA,  
ul. Zygmunta Augusta 11, 85-082 Bydgoszcz;  
tel. (0)52 339 13 70