

REGULACJA OPTYMALNA POD WZGLĘDEM ENERGETYCZNYM ASYNCHRONICZNYCH NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH REGULOWANYCH WEKTOROWO

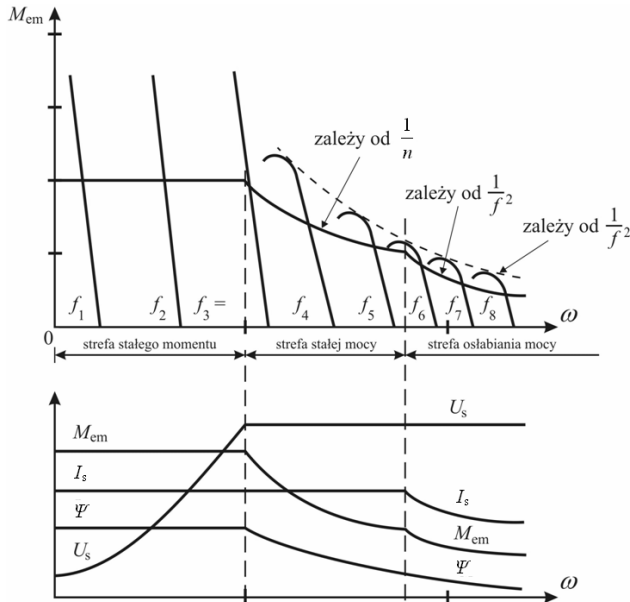
W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych modelu układu regulacji asynchronicznego napędu trakcyjnego, optymalnego pod względem energetycznym, wykorzystującego do tego celu technikę fuzzy logic. W napędach trakcyjnych, realizujących mniejsze wartości sił trakcyjnych, możliwe jest uzyskanie większej sprawności napędu (mniejszych strat) przez odpowiednie zmniejszenie strumienia magnetycznego w silniku trakcyjnym. Układ napędowy, regulowany wektorowo, zamodelowano w środowisku MATLAB-SIMULINK®. Podano przebiegi ilustrujące sposób działania tego układu regulacji.

Słowa kluczowe: trakcyjne napędy elektryczne, regulacja wektorowa napędów elektrycznych, regulacja energooptymalna, regulatory fuzzy logic.

WSTĘP

W większości eksploatowanych w praktyce kolejowych napędów trakcyjnych wartość strumienia magnetycznego silnika jest wyłącznie funkcją prędkości pojazdu. Wartość strumienia jest stała i równa wartości znamionowej strumienia w strefie stałego momentu i w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna do pulsacji napięcia stojana w strefie stałej mocy i w strefie osłabiania mocy (rys. 1) [10, 11, 13]. Dość wcześnie zauważono, że ten sposób regulacji strumienia nie jest optymalny pod względem energetycznym przy małych obciążeniach silnika [1, 2]. Okazało się, że przy małych wartościach momentu obciążenia korzystniejsza jest praca silnika przy mniejszych wartościach strumienia silnika Ψ , niżby to wynikało z rysunku 1.

W napędach regulowanych skalarnie zmianę wartości strumienia uzyskiwano przez odpowiednią zmianę wartości napięcia zasilania stojana. W początkowej fazie rozwoju napędów zmniejszono napięcie w obwodzie pośredniczącym prądu stałego [5], w późniejszych zaś rozwiązaniach stosowano modulację szerokości impulsów napięcia wyjściowego falownika. W napędach asynchronicznych, sterowanych wektorowo, optymalnych pod względem energetycznym, optymalny punkt pracy uzyskuje się przez zmianę wartości prądu i_d , który swoim charakterem odpowiada prądowi wzbudzenia w silniku obcowzbudnym prądu stałego. Wymaga to równoczesnej zmiany prądu i_q w taki sposób, aby moment rozwijany przez silnik trakcyjny nie uległ zmianie.



Rys. 1. Trzy strefy regulacji prędkości obrotowej napędu z silnikiem indukcyjnym: M_{em} – maksymalny moment elektromagnetyczny silnika, który może być rozwijany przez napęd, I_s – prąd stojana, Ψ – strumień magnetyczny silnika, U_s – napięcie stojana, f – częstotliwość napięcia stojana, ω – pulsacja napięcia stojana [10, 11, 13]

Fig. 1. Three regions of speed control of induction motors: M_{em} – maximum induced torque developed by the drive, I_s – current in the stator windings, Ψ – flux linkage of the motor, U_s – stator voltage, f – frequency of the stator voltage, ω – angular frequency of the stator voltage [10, 11, 13]

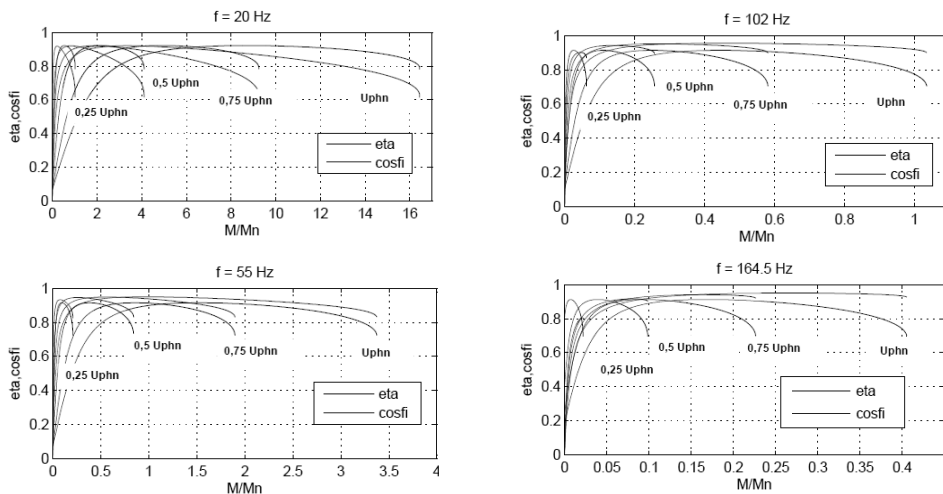
Stosuje się dwie podstawowe metody osiągnięcia optymalnego punktu pracy: metodę bezpośrednią i metodę pośrednią regulacji. W metodzie bezpośredniej szuka się bezpośrednio wartości maksymalnej sprawności lub wartości minimalnej strat w napędzie. Stosowane są do tego regulatory ekstremalne (szukające). Optymalny punkt pracy silnika można wyznaczyć, mierząc moc pobieraną i oddawaną przez napęd albo wykorzystując model strat silnika. Stosowanie modelu strat ograniczone jest do zasilania silnika napięciem sinusoidalnym, ponieważ w przypadku zasilania silnika napięciem odkształconym obliczenie strat w silniku jest praktycznie niemożliwe.

W przypadku pośrednich metod regulacji, optymalnych pod względem energetycznym, regulacji podlega inny, dodatkowy parametr silnika, np. współczynnik mocy silnika. Dla dowolnego silnika możliwe jest wyznaczenie takiej wartości współczynnika mocy silnika, przy którym sprawność silnika osiąga maksimum [7, 9]. Układ regulacji takiego wybranego parametru jest znacznie prostszy. Stosuje się tu zwykle regulatory do regulacji stałowartościowej. Często nie jest nawet wymagany regulator tego parametru w postaci oddzielnego urządzenia. Jeżeli warunki sprzętowe na to pozwalają, to całkowicie wystarcza dodatkowa aplikacja w układzie sterowania napędu.

1. OPTYMALNY PUNKT PRACY SILNIKA

Możliwość znalezienia optymalnego punktu pracy, charakteryzującego się maksymalną sprawnością lub minimalną wartością strat w silniku, wynikają bezpośrednio z charakterystyk roboczych silnika. Obliczenia przeprowadzono dla trakcyjnego silnika indukcyjnego, którego dane przedstawiono w [9].

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg sprawności tego silnika w zależności od momentu obciążenia dla różnych wartości napięcia stojana i różnych częstotliwości [9]. Charakterystyki te odpowiadają regulacji skalarnej prędkości obrotowej silnika, w której sygnałem regulacyjnym, służącym do osiągnięcia optymalnego punktu pracy, jest wartość napięcia stojana. Jak widać, każdej wartości napięcia stojana odpowiada pewna wartość momentu obciążenia, przy której sprawność osiąga maksimum. Optymalizacja energetyczna napędu może być przeprowadzana tylko przy małych obciążeniach silnika, mniejszych od momentu znamionowego, i to jedynie w ustalonym stanie pracy silnika. Praktycznie optymalizacja może być możliwa tylko w dwóch pierwszych strefach regulacji prędkości: stałego momentu i stałej mocy, czyli w przypadku tego silnika do częstotliwości napięcia stojana równej 102 Hz. W strefie trzeciej, czyli w strefie osłabiania mocy, moc, którą może rozwijać napęd, maleje, dlatego też możliwości optymalizacji punktu pracy silnika w trzeciej strefie regulacji są znacznie ograniczone.

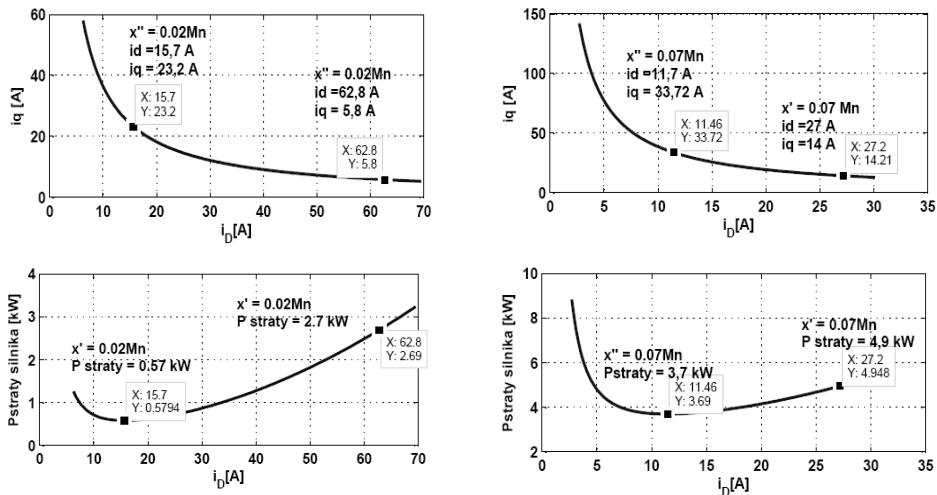


Rys. 2. Zależność sprawności silnika od momentu obciążenia przy różnych napięciach i częstotliwościach napięcia stojana: 20 Hz, 55 Hz, 102 Hz, 164,5 Hz [9]

Fig. 2. Efficiency of the motor versus load torque at various stator voltages and stator voltage frequencies: 20 Hz, 55 Hz, 102 Hz, 164,5 Hz [9]

Na rysunku 3 pokazano możliwość osiągnięcia optymalnego punktu pracy przez ten sam silnik trakcyjny, regulowany wektorowo (RFOC). Moment obciążenia silnika odniesiono do momentu maksymalnego, który może rozwijać napęd przy danej prędkości obrotowej $M_{\max}(v)$. Określa się go na podstawie charaktery-

styki trakcyjnej napędu, podanej w [9], w powiązaniu z zależnością wiążącą moment obrotowy silnika trakcyjnego z siłą trakcyjną pojazdu [10]. Do wyznaczania nowych optymalnych punktów pracy można zastosować metody bezpośrednie, wykorzystujące model strat silnika, lub układy mierzące i porównujące moc pobieraną i oddawaną przez napęd.



Rys. 3. Obliczone wartości zadane prądów i_d i i_q oraz strat w silniku P_{straty} : a), b) dla momentu zadanego wynoszącego 90 Nm, czyli 2% momentu maksymalnego $M_{max}(v)$ przy $v = 35$ km/h, c), d) dla momentu zadanego wynoszącego 97 Nm, czyli 7% $M_{max}(v)$ przy prędkości $v = 125$ km/h [8]

Fig. 3. Calculated reference values of currents i_d and i_q as well as motor power losses P_{straty} : a), b) for reference value of induced torque equal to 90 Nm, i.e. 2% of drive maximum torque $M_{max}(v)$ at the speed of $v = 35$ km/h, c), d) for reference value of induced torque equal to 97 Nm, i.e. 7% of drive maximum torque $M_{max}(v)$ at the speed of $v = 125$ km/h [8]

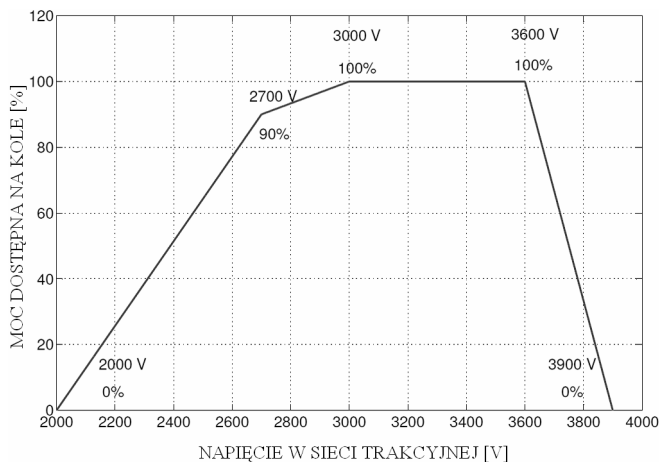
Oto przykłady optymalizacji energetycznej napędu [8]. Przy prędkości $v = 35$ km/h wartość prądu i_d została obniżona z 63 A (punkt x') do wartości 6,6 A (punkt x''). Dla utrzymania niezmięionej wartości momentu elektromagnetycznego zmieniono równocześnie wartość prądu i_q . Prąd ten wzrósł z wartości 6,0 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 równym 90 Nm, czyli $0,02 M_{max}(v)$, udało się zredukować wartość strat o 78%. Ograniczenie strat o 23% uzyskano również przy prędkości $v = 125$ km/h i obciążeniu równym 97 Nm, czyli $0,07 M_{max}(v)$.

Jak widać, możliwości ograniczania strat są tym większe, im mniejsze jest obciążenie silnika. Trzeba pamiętać, że w przypadku pojazdów kolejowych, zwłaszcza pasażerskich pociągów międzyaglomeracyjnych, przy odległościach między stacjami około 50 km większa część przejazdu danego odcinka (poza rozpędzaniem i hamowaniem) odbywa się ze stałą prędkością i przy użyciu bardzo małej siły trakcyjnej.

2. SPECYFIKA KOLEJOWYCH NAPĘDÓW ASYNCHRONICZNYCH NA 3 KV DC

W porównaniu z napędami przemysłowymi kolejowe napędy trakcyjne charakteryzują się pewnymi specyficznymi cechami. Najważniejsze z punktu widzenia regulacji optymalnej pod względem energetycznym są: możliwość pracy przy napięciach zasilania znacznie odbiegających od wartości znamionowej oraz stosunkowo niska częstotliwość PWM.

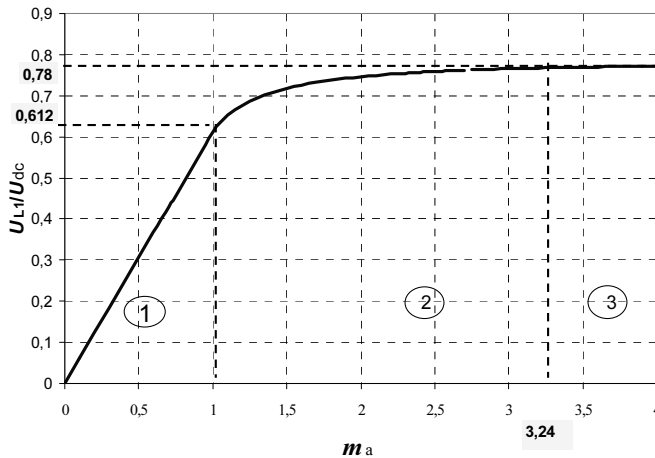
Zgodnie z normą [14] napięcie zasilania w sieci trakcyjnej może przyjmować na stałe wartości od 2000 V do 3600 V, a chwilowo, np. w czasie hamowania rekuperacyjnego, nawet 3900 V. Równocześnie norma [15] przewiduje, że dla zapewnienia stabilnej pracy napędu przy napięciach w sieci trakcyjnej mniejszych od 3000 V ograniczeniu musi ulec moc rozwijana przez napęd (rys. 4). Dlatego małe obciążenie silnika może, przy obniżonym napięciu w sieci trakcyjnej, stać się względnie duże i porównywalne z maksymalną mocą, którą może rozwinąć napęd przy danej prędkości $M_{\max}(v)$.



Rys. 4. Procent mocy dostępnej na kole w zależności od napięcia w sieci trakcyjnej według normy [15]

Fig. 4. Percentage of the power available at the wheel rim versus catenary voltage according to the standard [15]

W falownikach trakcyjnych, zasilanych z sieci 3000 V DC, w których stosuje się struktury dwupoziomowe, częstotliwość PWM nie przekracza 400 Hz. Taka wartość jest stosowana ze względu na konieczność ograniczenia strat mocy w falowniku. Wiąże się z tym jednak problem dodatkowych strat w silniku, spowodowanych odkształceniem napięć i prądów zasilania silnika. Okazuje się, że ze względu na stosunkowo małą częstotliwość PWM najbardziej niekorzystną dla silnika strefą pracy przekształtnika trakcyjnego jest strefa nadmodulacji. Dużo mniejsze straty dodatkowe występują w obszarze pracy bez modulacji PWM (rys. 5).



Rys. 5. Zależność pierwszej harmonicznej napięcia międzyprzewodowego falownika U_{L1} w funkcji współczynnika głębokości modulacji m_a (U_{dc} – napięcie w sieci trakcyjnej):
 ① – strefa modulacji sinusoidalnej, ② – strefa nadmodulacji,
 ③ – strefa bez modulacji PWM [13]

Fig. 5. Fundamental component of line-to-line inverter voltage U_{L1} versus amplitude modulation ratio m_a (U_{cat} – catenary voltage): ① – sinusoidal modulation region, ② – overmodulation region, ③ – 6-step modulation region [13]

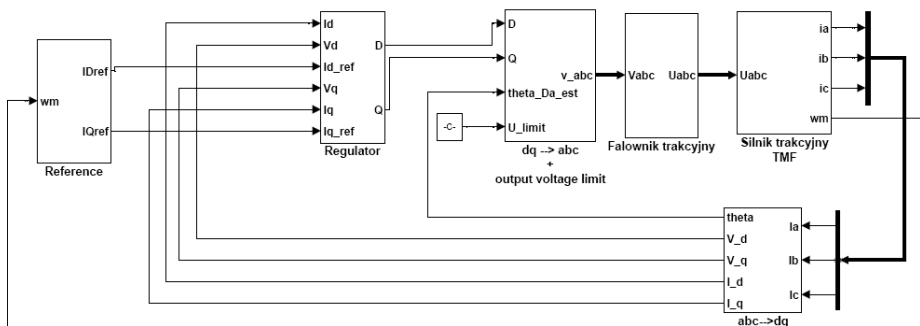
Należy zauważyć, że kształt napięcia zasilającego silnik nie zależy tylko od bieżących parametrów napędu trakcyjnego, ale również od napięcia sieci trakcyjnej. Silnik trakcyjny, pracujący z jednakową mocą wyjściową, może być w zależności od wartości napięcia trakcyjnego zasilany z falownika pracującego np. w strefie nadmodulacji, a w innym przypadku z falownika pracującego w strefie bez modulacji. Te zjawiska jeszcze bardziej utrudniają analizę pracy silnika.

Zasilanie silnika trakcyjnego z przekształtnika trakcyjnego powoduje powstawanie wyższych harmonicznych prądu i napięcia w obwodach silnika. O ile uwzględnienie dodatkowych strat w elementach przewodzących, spowodowanych przez harmoniczne, jest stosunkowo proste, o tyle wyznaczenie dodatkowych strat w żelazie, wynikłych z tych harmonicznych, jest praktycznie niemożliwe.

Wszystko to sprawia, że w przypadku regulacji optymalnej pod względem energetycznym rzeczywistych napędów trakcyjnych praktycznie nie znajdują zastosowania pośrednie metody regulacji, wykorzystujące model strat silnika. Ze względu na opisane wcześniej uwarunkowania w napędach trakcyjnych optymalnych pod względem energetycznym oprócz standardowego regulatora siły trakcyjnej i /lub prędkości (za pomocą tempomatu) konieczne jest użycie stosunkowo skomplikowanego regulatora ekstremalnego, mierzącego moc na wejściu i na wyjściu układu. Należy zauważyć, że w praktyce regulacja siły trakcyjnej pojazdu polega na regulacji momentu obrotowego poszczególnych silników trakcyjnych, gdyż siła trakcyjna pojazdu jest wprost proporcjonalna do momentu obrotowego silnika [10].

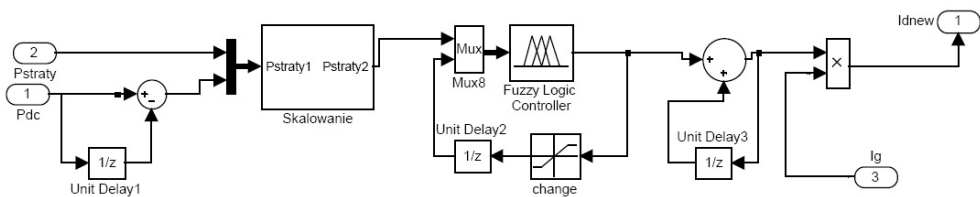
3. MODEL SYMULACYJNY NAPĘDU TRAKCYJNEGO

Przyjęty do badań model symulacyjny, wykorzystujący metodę RFOC, zrealizowano w środowisku MATLAB-SIMULINK® (rys. 6). Był on przedmiotem publikacji [3, 4]. W celu uproszczenia modelu i przyspieszenia symulacji falownik trakcyjny został ustawiony na stałą częstotliwość PWM, równą 2 kHz. Ze względu na wysoką częstotliwość PWM do obliczania strat przyjęto wzory, które stosuje się przy sinusoidalnym zasilaniu silnika. Nie jest to zgodne z rzeczywistymi warunkami istniejącymi w napędach trakcyjnych, wykorzystujących falowniki dwupoziomowe, w których częstotliwość PWM nie przekracza 400 Hz. Można jednak przyjąć takie uproszczenie, aby zilustrować samą ideę regulacji optymalnej pod względem energetycznym, z regulatorami ekstremalnymi, wykorzystującymi technikę *fuzzy logic*.



Rys. 6. Model symulacyjny napędu trakcyjnego wykorzystujący RFOC, przyjęty do badań [3, 4]

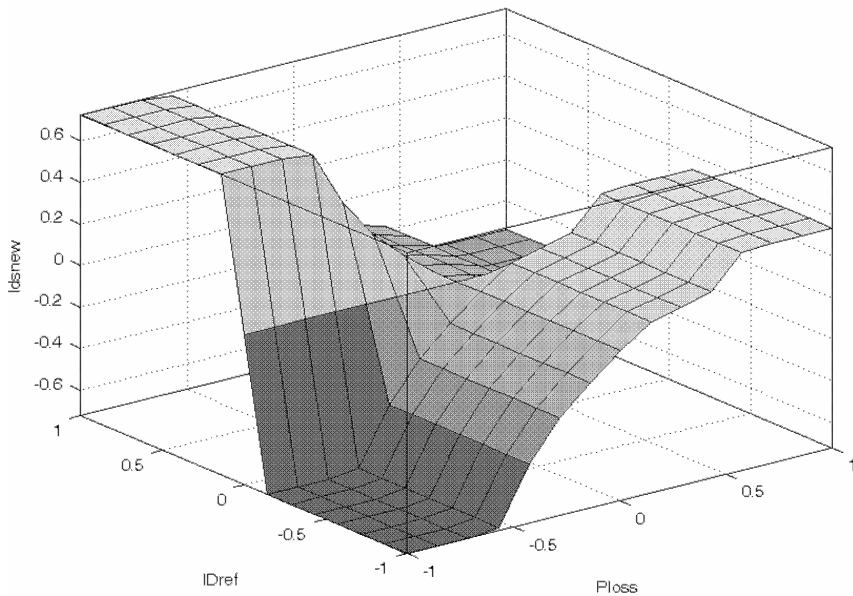
Fig. 6. Simulation model of the traction drive employing RFOC used in tests [3, 4]



Rys. 7. Schemat blokowy układu regulacji prądu I_d

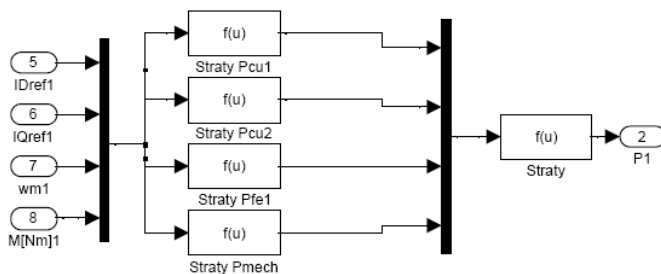
Fig. 7. Block diagram of current I_d control

Model silnika uzupełniono o moduł *fuzzy logic* do optymalizacji energetycznej napędu (rys. 7 i 8), zrealizowany przez autora na podstawie [12], oraz o moduł do obliczania strat mocy w silniku we współrzędnych d i q (rys. 9), również stworzony przez autora. Moduł *fuzzy logic* bazuje na pomiarze mocy pobieranej i oddawanej przez napęd trakcyjny. Przez stopniowe regulowanie prądu i_d oraz i_q obniża on straty mocy w układzie, które każdorazowo obliczane są przez moduł do obliczania strat w silniku. Zadaniem modułu *fuzzy logic* jest znalezienie takich wartości prądu i_d oraz i_q , przy których straty w układzie osiągają minimum.



Rys. 8. Zależność prądu I_d , P_{straty} oraz $I_{d \text{ new}}$ w module fuzzy logic

Fig. 8. Interdependence of current I_d , power losses P_{straty} and current $I_{d \text{ new}}$ in the fuzzy logic module



Rys. 9. Moduł do obliczania strat w silniku

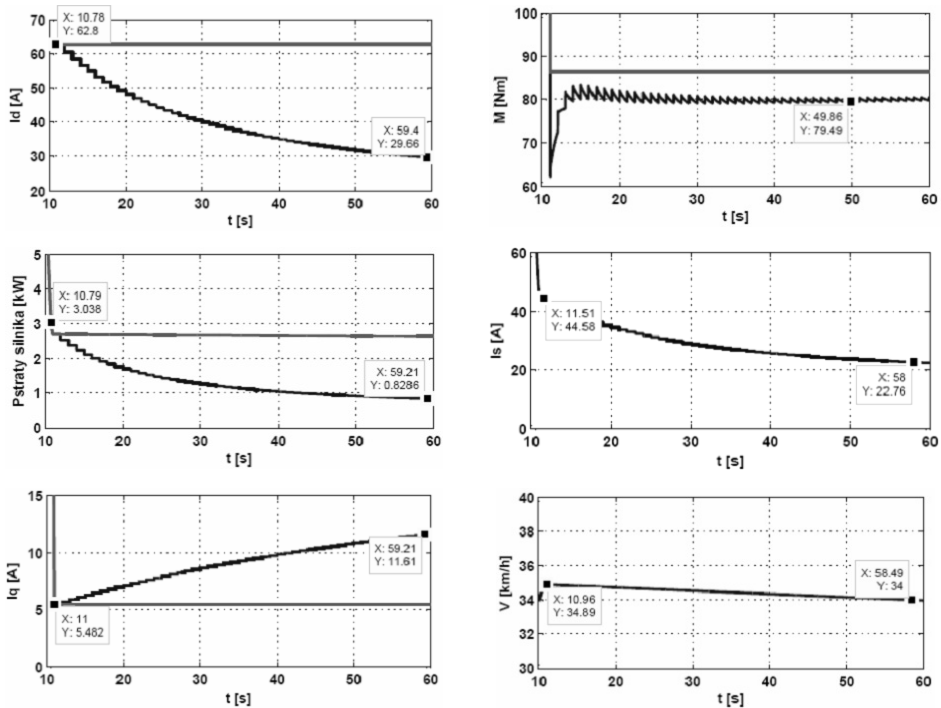
Fig. 9. Module for motor power loss calculations

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Do modelu wprowadza się wartość zadaną momentu elektromagnetycznego, rozwijanego przez silnik, oraz jego prędkość. Przyjęto takie same wartości tych wielkości jak w rozdziale 1 tego artykułu (rys. 3):

- $v = 35 \text{ km/h}$, $F = 5 \text{ kN}$, $M = 90 \text{ Nm}$, czyli 2% wartości momentu maksymalnego $M_{\text{max}}(v)$;
- $v = 125 \text{ km/h}$, $F = 5 \text{ kN}$, $M = 97 \text{ Nm}$, czyli 7% wartości momentu maksymalnego $M_{\text{max}}(v)$.

Te wartości zadane były utrzymywane przez cały czas trwania procesu optymalizacji. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 10 i 11.

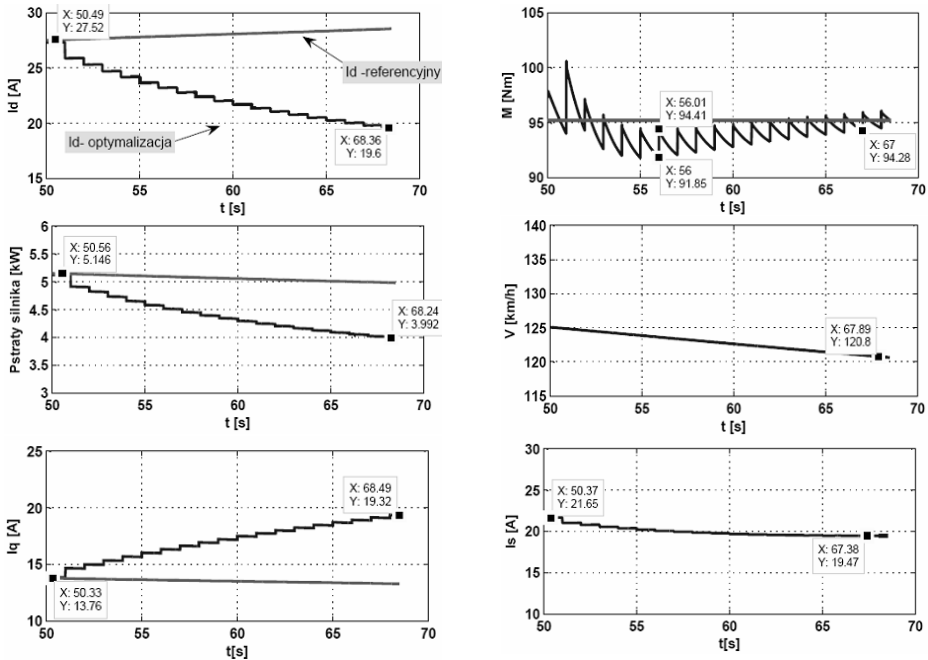


Rys. 10. Wyniki symulacji z wykorzystaniem modelu szukającego optymalnego punktu pracy, pokazujące regulację prądów i_d i i_q , dla momentu zadanego wynoszącego 90 Nm, czyli 2% momentu maksymalnego $M_{\max}(v)$ przy $v = 35$ km/h

Fig. 10. Simulation results of the model searching the optimum operation point that show changes in currents i_d and i_q , $v = 35$ km/h for the induced reference torque equal to 90 Nm, i.e. 2% of drive maximum torque $M_{\max}(v)$ at the speed of $v = 35$ km/h

Regulator *fuzzy logic*, optymalizujący zużycie energii, włącza się w momencie, gdy moment rozwijany przez napęd zmniejszy się do $0,25 M_{\max}(v)$. To sprawia, że rozpoczyna on działanie praktycznie po zakończeniu procesu rozpedzania się pojazdu. Dodatkowo włącza się każdorazowo po zmianie wartości momentu zadanego, realizowanego przez napęd.

Na zarejestrowanych przebiegach widać, w jaki sposób dochodzi do zmiany wartości regulowanych oraz jak wpływa taka regulacja na straty w całym układzie napędowym. Zastosowany model nie posiada układu kompensacji wartości momentu elektromagnetycznego, rozwijanego przez napęd, co w efekcie daje widoczne na wykresach wahania wartości momentu elektromagnetycznego. Jest to zjawisko niepożądane i jego usunięcie wymaga wprowadzenia specjalnych algorytmów. Pulsacje momentu, a zatem i siły trakcyjnej, są również przyczyną zmniejszenia się wartości średniej siły trakcyjnej, co w rezultacie skutkuje nieznacznym zmniejszeniem prędkości pojazdu.



Rys. 11. Wyniki symulacji z wykorzystaniem modelu szukającego optymalnego punktu pracy, pokazujące regulację prądów i_d i i_q , dla momentu zadanego wynoszącego 97 Nm, czyli 7% $M_{max}(v)$ przy prędkości $v = 125$ km/h

Fig. 11. Simulation results of the model searching the optimum operation point that show changes in currents i_d and i_q , $v = 125$ km/h for the induced reference torque equal to 97 Nm, i.e. 7% of drive maximum torque $M_{max}(v)$ at the speed of $v = 125$ km/h

Cały proces optymalizacji zajmuje od 20 do 60 s, zależnie od położenia punktu pracy na charakterystyce trakcyjnej napędu. Niekorzystne jest również to, że przy jakiegokolwiek zmianie momentu zadanego układ powraca do pierwotnych ustawień i konieczne staje się poszukiwanie kolejnego, optymalnego punktu pracy. W związku z tym w przypadku stosowania regulatorów optymalizujących zużycie energii konieczne byłoby zastosowanie tempomatu, który pozwala na ciągłe, zależne tylko od oporów ruchu pojazdu, zadawanie wartości siły trakcyjnej układu napędowego (wartość takiej siły jest wtedy mała, a liczba zmian wartości siły niewielka) w miejsce zadawania impulsowego siły trakcyjnej, stosowanej przez maszynistów (wartość takiej siły w momencie zadawania jest wtedy duża, a liczba jej zmian też jest duża). Zaletą tego typu regulatora jest to, że regulator szukający określa ostatecznie optymalny punkt pracy dla całego łańcucha napędowego, a nie tylko dla silnika, jak to ma miejsce w przypadku stosowania modelu strat silnika.

Rozwiązaniem optymalnym byłoby zastosowanie układu mieszanego. System powinien być wyposażony w model silnika oraz w regulator szukający optymalnego punktu pracy. Wstępne osiągnięcie przybliżonego, optymalnego punktu pracy przez zastosowanie modelu silnika do wyznaczenia parametrów regulacji jest proste. Potrzebny jest tylko czas na obliczenie przez procesor parametrów I_d i I_q

w zależności od częstotliwości i wartości zadanej momentu elektromagnetycznego silnika [8]. W pierwszej kolejności więc powinien być włączony układ modelu strat silnika, minimalizujący w dużym przybliżeniu straty w samym silniku, a następnie regulator szukający powinien małymi krokami dążyć do dalszego zmniejszenia strat w całym łańcuchu napędowym.

PODSUMOWANIE

W napędach trakcyjnych, realizujących mniejsze od dostępnych maksymalnych wartości sił trakcyjnych, możliwe jest uzyskanie większej sprawności napędu (mniejszych strat) przez odpowiednie zmniejszenie strumienia w silnikach trakcyjnych.

Optymalizacja energetyczna możliwa jest zarówno w napędach regulowanych skalarnie, jak i w napędach regulowanych wektorowo. W napędach trakcyjnych regulowanych wektorowo najlepiej do tego celu nadają się regulatory ekstremalne (szukające), bazujące na pomiarze mocy wejściowej i wyjściowej napędu trakcyjnego. Metody bazujące na modelu strat silnika są znacznie mniej dokładne ze względu na niedokładności i niejednoznaczności modeli strat silnika, spowodowane głównie przez wyższe harmoniczne napięć i prądów silnika.

Środowisko MATLAB-SIMULINK[®] można wykorzystać do tworzenia modeli elektrycznych napędów trakcyjnych. Oprócz wyznaczania typowych przebiegów dynamicznych napędu model taki umożliwia obliczenie strat w układzie napędowym oraz optymalizację energetyczną układu napędowego, tzn. wyznaczanie punktów pracy, charakteryzujących się najmniejszymi stratami. Jedną z wielu możliwości realizacji regulacji optymalnej pod względem energetycznym jest zastosowanie techniki *fuzzy logic*, wykorzystanej w modelu przedstawionym w tym artykule.

Wyniki symulacji układu regulacji, wykorzystującego tę technikę, pokazują, że ze względu na stosunkowo długi czas szukania optymalnego punktu pracy konieczne staje się w takim przypadku stosowanie w kolejowych pojazdach szynowych tzw. tempomatów, zapewniających rozwijanie przez napęd siły trakcyjnej o stałej i stosunkowo małej wartości przy stałej prędkości pojazdu. Usuwiają one konieczność impulsowego zadawania siły trakcyjnej, jak to ma miejsce przy typowym w napędach trakcyjnych zadawaniu siły trakcyjnej przez maszynistę. Każda zmiana wartości zadanej siły trakcyjnej wywołuje konieczność poszukiwania nowego, optymalnego punktu pracy.

Dodatkowe przyspieszenie czasu regulacji można uzyskać, stosując regulator ekstremalny, wykorzystujący w pierwszej fazie regulacji mało dokładny, lecz szybki model strat silnika, w drugiej zaś fazie wykorzystujący pomiar mocy na wejściu i wyjściu układu napędowego, który z dużą dokładnością znajduje punkt optymalnej pracy napędu.

LITERATURA

1. Abrahamson F. et al., *On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motors in CT and HVAC applications*, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, Issue: 4, 1998, s. 822–831.
2. Edwards J.B., Eren H., *Controlling electric traction drives for minimum energy wastage*, PROC. IEE, Vol. 126, No. 3, March 1979, s. 254–260.
3. Jarzębowicz 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, s. 121–131.
4. Judek S., Karwowski K., Lipiński L., Miszewski M., *Modelowanie i symulacja napędów elektrycznych kolejowych pojazdów trakcyjnych z silnikami indukcyjnymi*, Pojazdy Szynowe, 2010, nr 3, s. 25–29.
5. Klose Ch., *Reduzierung des Energiebedarfs von Hochgeschwindigkeits-Triebzügen durch ein Verfahren zur Systemoptimierung der Steuerung von Triebfahrzeugen*, Dissertation an der Technischen Universität, Dresden 1999.
6. Lim S., Nam K., *Loss-minimizing control scheme for induction motor's*, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 4, July 2004.
7. Lipiński L., *Praktyczne metody regulacji trakcyjnych silników indukcyjnych optymalne pod względem energetycznym*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2007, nr 78, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych (BOBRME) Komel, Katowice, s. 109–114.
8. Lipiński L., *Wykorzystanie metod symulacji do analizy pracy i doboru nastaw regulatorów trakcyjnych napędów asynchronicznych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2012, nr 1(94), BOBRME Komel, Katowice, s. 75–80.
9. Lipiński L., Miszewski M., *Ocena współczynnika mocy silnika jako parametru optymalizacyjnego w skalarnych napędach asynchronicznych, optymalnych pod względem energetycznym*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2011, nr 90, BOBRME Komel, Katowice, s. 45–50.
10. Lipiński L., Miszewski M., *Wyznaczanie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2012, nr 94, BOBRME Komel, Katowice, s. 67–74.
11. Lipiński L., Miszewski M., Żarnowski R., *Nowoczesne asynchroniczne napędy przekształtnikowe dla pasażerskich pojazdów trakcyjnych na napięcie 3 kV prądu stałego*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2007, nr 6, s. 33–45.
12. Liwei Z., Liu Xuhui W., *A new fuzzy logic based search control for efficiency optimization of induction motor drives*, In proceeding of The 7th International Power Engineering Conference, 2005, IPEC 2005.
13. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., *Power Electronics*, John Wiley & Sons, Inc., New York 2003.
14. *Norma PN-EN 50163 Zastosowania kolejowe – Napięcia zasilające systemów trakcyjnych.*
15. *Norma PN-EN 50388 Zastosowania kolejowe – System zasilania i tabor – Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i tarem w celu osiągnięcia interoperacyjności.*

ENERGY OPTIMAL CONTROL OF VECTOR-CONTROLLED TRACTION DRIVES WITH INDUCTION MOTORS

Summary

The paper presents the simulation results of a vector-controlled traction drive with the induction motor with an additional fuzzy logic controller for energy optimal control of the drive. In traction drives under partial loads, there is a possibility of increasing the efficiency of the traction motor by decreasing the traction motor flux properly. The simulation model of the vector-controlled traction drive was created in the MATLAB-SIMULINK® environment. The curves illustrated the controlling process achieved with the help of the simulation model are given.

Keywords: *electric traction drives, vector control of electric driver, energy optimal control, fuzzy logic controllers.*