

Lech Lipiński, Mirosław Miszewski  
Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA Holding, Bydgoszcz

## OCENA WSPÓŁCZYNNIKA MOCY SILNIKA JAKO PARAMETRU OPTYMALIZACYJNEGO W SKALARNYCH NAPĘDACH ASYNCHRONICZNYCH, OPTYMALNYCH POD WZGLĘDEM ENERGETYCZNYM

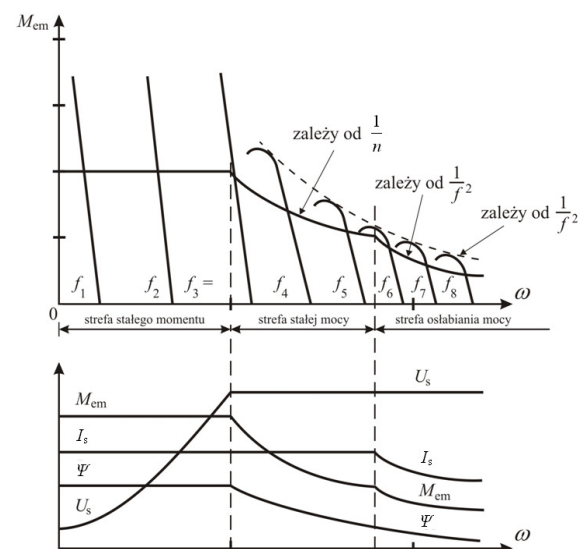
### ASSESSMENT OF THE MOTOR POWER FACTOR AS AN OPTIMIZING PARAMETER IN SCALAR-CONTROLLED ENERGY OPTIMAL ELECTRIC DRIVES WITH INDUCTION MOTORS

**Abstract:** In electric drives with induction motors, it is possible to achieve higher efficiency under partial loads of the motor by decreasing its air-gap flux. In this paper, the power factor of the motor in scalar-controlled drives is assessed as an optimizing parameter in comparison to the motor slip and the rotor voltage frequency using indirect method of energy optimal control with the stator voltage as an actuating parameter. In such drives, it is possible to achieve the optimal operating point that is characterized by the minimum power losses or by the maximum efficiency in a very simple way. Making use of parameters of the hypothetical motor, the calculations of the sensitivity of the selected optimizing parameters to remaining parameters of the drive are used for assessing the usefulness of particular optimizing parameters. It is proved that the best results are achieved if the motor power factor is used as the controlled optimizing parameter.

#### 1. Wstęp

W napędach asynchronicznych przy małych obciążeniach można uzyskać zwiększenie sprawności, odpowiednio zmniejszając wartość strumienia magnetycznego silnika. Zwykle regulacja prędkości silnika indukcyjnego odbywała się w taki sposób, że w strefie stałego momentu utrzymywana była stała wartość strumienia magnetycznego w silniku, a w strefach stałej mocy i osłabiania mocy wartość strumienia  $\Psi$  była w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna do pulsacji napięcia stojana  $\omega$ , tak aby wartość napięcia na zaciskach stojana nie przekraczała wartości znamionowej (rys. 1). Nawet w przypadku napędów dużej mocy zasadą było utrzymywanie maksymalnej wartości strumienia, wynikającej z bieżącej wartości pulsacji napięcia stojana. Dość wcześnie zauważono, że ten sposób regulacji strumienia nie jest optymalny pod względem energetycznym, szczególnie przy małych obciążeniach silnika [3]. Okazało się, że przy małych wartościach momentu obciążenia korzystniejsza jest praca silnika przy mniejszych wartościach strumienia  $\Psi$ , niż to wynika z rysunku 1. W napędach skalarnych zmianę wartości strumienia uzyskuje się przez odpowiednią zmianę wartości napięcia zasilania stojana. Uzyskiwano to w początkowej fazie rozwoju napędów przez zmianę napięcia w obwodzie pośredniczącym

prądu stałego [5], w późniejszych zaś rozwiązaniach za pomocą modulacji szerokości impulsów napięcia wyjściowego falownika.



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,  $\Psi$  – strumień magnetyczny silnika,  $U_s$  – napięcie stojana,  $f$  – częstotliwość napięcia stojana,  $\omega$  – pulsacja napięcia stojana

W asynchronicznych napędach elektrycznych, optymalnych pod względem energetycznym typowym sygnałem regulacyjnym, za pomocą którego uzyskuje się optymalny punkt pracy, jest wartość napięcia stojana. Stosuje się dwie podstawowe metody osiągnięcia tego punktu. W metodzie pierwszej – bezpośredniej – optymalny punkt pracy osiąga się, obliczając straty w układzie napędowym. Wykonać to można dwiema metodami: mierząc i porównując ze sobą moc wejściową i wyjściową napędu, lub obliczając straty mocy na podstawie modelu strat silnika, zaimplementowanym w układzie sterowania napędu. W obu przypadkach wymaga to stosowania stosunkowo skomplikowanych i drogich regulatorów ekstremalnych. (szukających).

Optymalny punkt pracy silnika można osiągnąć, stosując znacznie prostsze pośrednie metody regulacji optymalnej pod względem energetycznym. Jako parametr optymalizacyjny wykorzystuje się jeden z następujących parametrów silnika: współczynnik mocy, poślizg lub częstotliwość napięcia wirnika [1]. Układ regulacji takiego parametru jest znacznie prostszy. Wystarczają tu zwykle regulatory do regulacji stałowartościowej. Często nie jest wymagany regulator jako oddzielne urządzenie. Jeżeli warunki sprzętowe na to pozwalają, to całkowicie wystarcza do tego celu dodatkowa aplikacja w układzie sterowania napędu. Do pośrednich metod regulacji zalicza się też układy, w których optymalna wartość napięcia wyznaczana jest analitycznie [2]. Problemem tego typu układów jest stałość parametrów silnika, wykorzystanych do obliczeń.

W artykule zajęto się tylko problemem strat w samym silniku indukcyjnym, pomijając problem strat w przekształtniku. Takie podejście jest dopuszczalne tylko w stosunku do napędów o mocy nieprzekraczającej 50 kW. Tylko w przypadku napędów o takiej mocy straty w przekształtniku są stosunkowo małe w porównaniu do strat w samym silniku [1]. W przypadku napędów większej mocy w rozważaniach należy uwzględnić straty w przekształtniku. To uniemożliwiłoby korzystania ze stosunkowo prostych metod pośredniej regulacji prędkości, optymalnych pod względem energetycznym. Jednak w przypadku napędów o mocy do kilkuset kilowatów można wykazać, że jeżeli zminimalizować straty mocy w silniku, to straty w przekształtniku stają się zbliżone do strat minimalnych [1]. Pozwala to również i w takich

przypadkach korzystać z pośrednich metod regulacji. Dopiero napędy o bardzo dużej mocy, rzędu jednego megawata, bezwzględnie wymagają uwzględnienia strat w przekształtniku. W takich przypadkach konieczna jest rezygnacja z uproszczonych metod regulacji i zastosowanie do celów optymalizacji energetycznej regulatorów ekstremalnych.

## 2. Model silnika indukcyjnego wykorzystany do optymalizacji

### 2.1. Dane silnika do optymalizacji

Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych przyjęto silnik trakcyjny stosowany do napędu ciężkich pojazdów szynowych (tabl. 1). Pozostałe dane, niezbędne do obliczenia strat, wyznaczono metodą regresji w trakcie próby typu silnika.

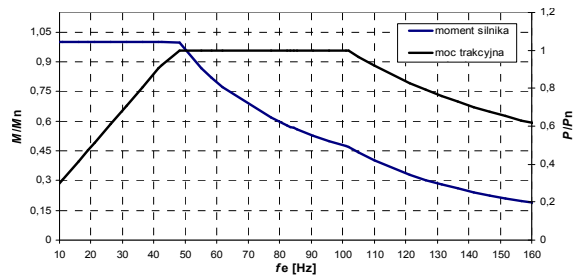
Tabela 1. Dane silnika do optymalizacji

Lp.	Parametr	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.	Znamionowy współczynnik mocy	0,90
6.	Znamionowy prąd stojana	145,3 A
7.	Znamionowa częstotliwość stojana	58,4 Hz
8.	Liczba biegunów	4
9.	Rezystancja uzwojenia stojana (130°C)	0,1798 $\Omega$
10.	Reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana	0,99125 $\Omega$
11.	Rezystancja uzwojenia wirnika (150°C)	0,08530 $\Omega$
12.	Reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika	0,54643 $\Omega$
13.	Reaktancja magnesująca	31,292 $\Omega$
14.	Sprawność	94,3%

Do dalszych obliczeń przyjęto parametry silnika nagrzanego, to znaczy parametry stojana w temperaturze 130°C i parametry wirnika w temperaturze 150°C.

Charakterystykę trakcyjną silnika przyjętego do obliczeń przedstawiono na rysunku 2. Ze względu na wygodę charakterystykę tę przeliczono tak, aby oś odciętych moc wyskalować w częstotliwości napięcia stojana, zamiast, jak to się zwykle spotyka w praktyce, w prędkości

obrotowej silnika lub w prędkości liniowej napędzanego pojazdu.



Rys. 2. Charakterystyka trakcyjna silnika przyjętego do obliczeń

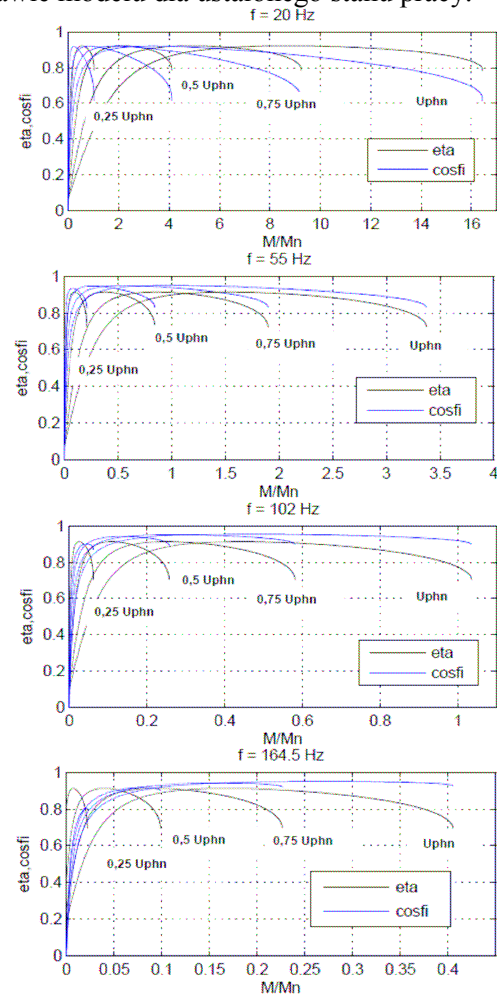
## 2.2. Obliczanie strat silnika przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym

Wykorzystuje się tu typowe zależności do obliczania strat w silniku indukcyjnym przy zasilaniu sinusoidalnym. Ponieważ optymalizację pracy silnika przeprowadza się w stanie ustalonym, do obliczeń wykorzystano typowy model silnika indukcyjnego dla stanu ustalonego – schemat zastępczy typu T. Analogiczne metody obliczeń można również z powodzeniem stosować w przypadku zasilania silnika z falownika napięcia z PWM pod warunkiem, że częstotliwość przełączeń jest dostatecznie duża. W praktyce częstotliwość PWM musi przekraczać 2000 Hz. Oznacza to, że można ją stosować do układów napędowych wykorzystujących falowniki dwupoziomowe zasilane z sieci niskiego napięcia lub z sieci średniego napięcia za pośrednictwem transformatora obniżającego napięcie. W układach napędowych zasilanych bezpośrednio z sieci średniego napięcia takie wysokie częstotliwości przełączeń można uzyskać tylko w przypadku stosowania falowników wielopoziomowych. Warunkiem koniecznym jest to, aby straty dodatkowe w silniku, spowodowane odkształceniem krzywej napięcia zasilania, były pomijalnie małe. W innych przypadkach, na przykład w rzeczywistym silniku trakcyjnym dla trakcji prądu stałego 3 kV, zasilanym z przekształtnika dwupoziomowego, przy stosunkowo niskiej częstotliwości przełączania tranzystorów falownika, napięcie zasilania stojana jest w znacznym stopniu odkształcone i taki sposób obliczeń daje zaniżone wartości strat.

## 3. 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, wyznaczonych na podstawie modelu dla ustalonego stanu pracy.



Rys. 3. Zależność sprawności silnika od momentu obciążenia przy różnych napięciach stojana: a)  $f = 20$  Hz, b)  $f = 55$  Hz, c)  $f = 102$  Hz, d)  $f = 164,5$  Hz

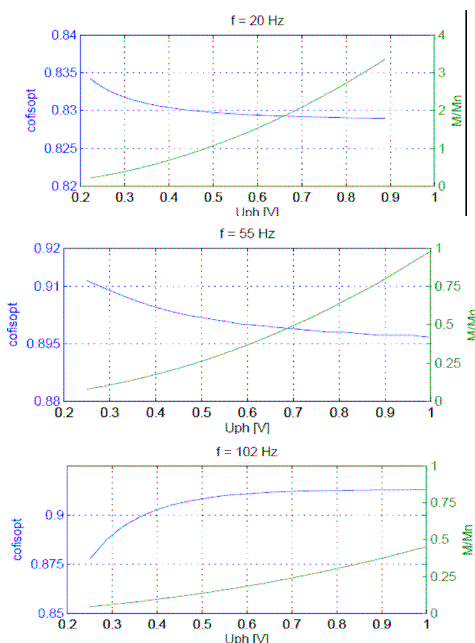
Na rysunku 3 przedstawiono przebieg sprawności silnika w zależności od momentu obciążenia dla różnych wartości napięcia stojana i różnych częstotliwości. Charakterystyki te odpowiadają regulacji skalarnej prędkości obrotowej silnika, w której sygnałem regulacyjnym, służącym do osiągnięcia optymalnego punktu pracy, jest wartość napięcia stojana. Jak widać, każdemu przebiegowi sprawności między biegiem jałowym a momentem maksymalnym silnika, przy określonym napięciu 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 tylko w ustalonym stanie pracy silnika. Praktycznie

optymalizacja może być realizowana 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, maleje moc, którą może rozwijać silnik. Dlatego możliwości optymalizacji punktu pracy silnika w trzeciej strefie regulacji są znacznie ograniczone i nie będą rozpatrywane w dalszej części artykułu.

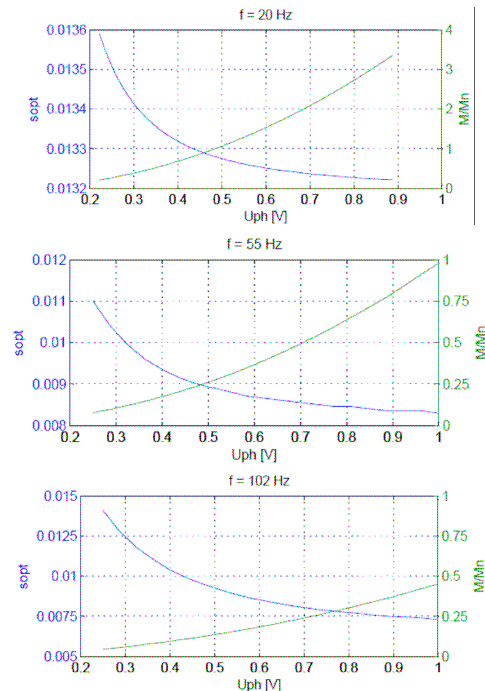
#### 4. Ocena wybranych parametrów optymalizacyjnych przy użyciu wrażliwości

Najlepszym parametrem optymalizacyjnym byłby taki parametr, którego wartość w całym zakresie pracy silnika byłaby stała. W praktyce jednak taki parametr nie istnieje. Najważniejszym wymaganiem stawianym parametrowi optymalizacyjnemu staje się jego niewrażliwość na zmiany sygnału regulacyjnego oraz łatwość jego pomiaru. Ponadto parametr optymalizacyjny powinien być niewrażliwy na zmiany pozostałych parametrów silnika i parametrów zewnętrznych, na które nie mamy żadnego wpływu lub których zmienności nie znamy.

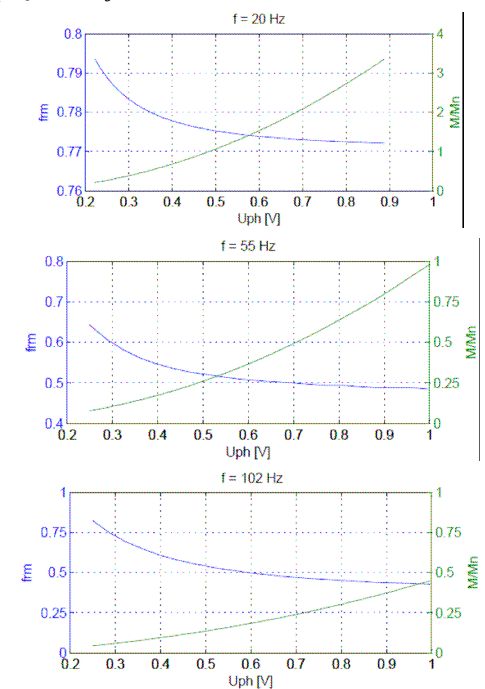
Wstępnie przydatność poszczególnych parametrów optymalizacyjnych można ocenić, badając ich zależność od sygnału regulacyjnego, czyli od napięcia stojana silnika.



Rys. 4. Zależność optymalnego współczynnika mocy (dla  $\eta = \eta_{max}$ ) oraz względnego momentu rozwijanego w tym punkcie przez silnik w zależności od napięcia stojana dla różnych częstotliwości napięcia stojana.



Rys. 5. Zależność optymalnego poślizgu (dla  $\eta = \eta_{max}$ ) oraz względnego momentu rozwijanego w tym punkcie przez silnik w zależności od napięcia stojana dla różnych częstotliwości napięcia stojana



Rys. 6. Zależność optymalnej częstotliwości wirnika (dla  $\eta = \eta_{max}$ ) oraz względnego momentu rozwijanego w tym punkcie przez silnik w zależności od napięcia stojana dla różnych częstotliwości napięcia stojana

Krzywe te przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6. Widać, że najmniejszymi zmianami wartości przy zmianach napięcia stojana charakteryzuje się optymalny współczynnik mocy (rys. 4).

Jednak pełną ocenę przydatności poszczególnych parametrów będzie można wykonać, badając wrażliwość (czułość) poszczególnych parametrów optymalizacyjnych na zmiany wartości i częstotliwości napięcia stojana i na zmiany innych parametrów układu napędowego.

Formalnie wrażliwość parametru optymalizacyjnego opisuje wzór znany z teorii sterowania [4]:

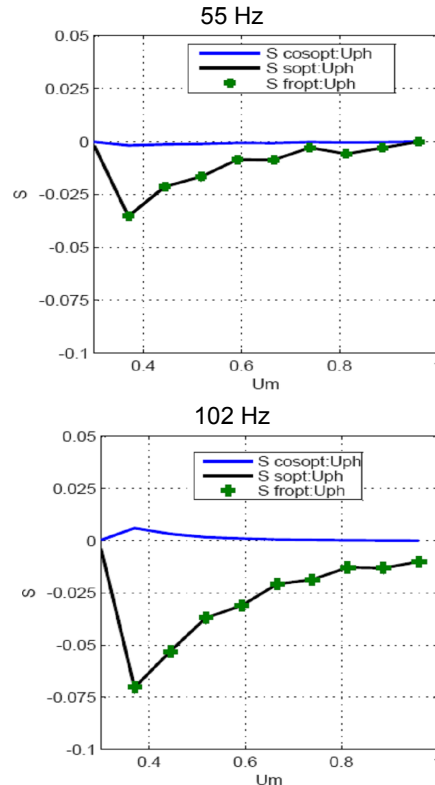
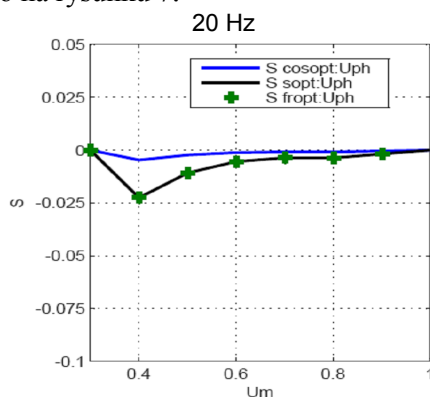
$$S_{F,P} = \frac{P}{F} \frac{\partial F}{\partial P} \quad (1)$$

w którym:  $F$  – parametr zasilania silnika wybrany jako parametr optymalizacyjny,

$P$  – dowolny inny parametr silnika lub otoczenia.

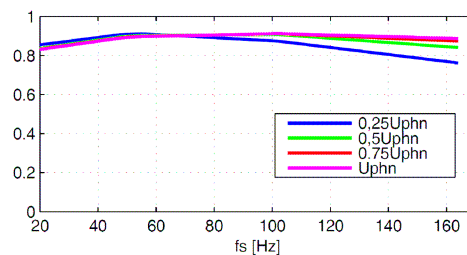
Należy jednak żądać jak najmniejszych wartości wrażliwości na zmiany napięcia stojana, gdyż ten właśnie parametr wybrany jest jako parametr regulacyjny, który jest regulowany w celu uzyskania optymalnego punktu pracy silnika. Uwzględnienie zmienności parametru optymalizacyjnego od wartości napięcia stojana spowodowałoby pracę algorytmu optymalizującego punkt pracy silnika, gdyż w trakcie procesu optymalizacji, wiążącego się ze zmianami napięcia stojana, konieczne byłoby korygowanie wartości parametru optymalizacyjnego. Pozostałe parametry silnika, takie jak częstotliwość napięcia stojana, zmieniają się nieznacznie lub wcale w toku procesu optymalizacji i z tego powodu wartość parametru optymalizacyjnego nie wymaga korygowania w czasie procesu osiągnięcia optymalnego punktu pracy.

Wrażliwość wybranych parametrów optymalizacyjnych na zmiany napięcia stojana przy regulacji skalarnej prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wrażliwości optymalnego współczynnika mocy  $cosopt$ , optymalnego poślizgu  $sopt$  i optymalnej częstotliwości napięcia wirnika  $fopt$  na zmiany wartości napięcia stojana

Jak widać najmniejszymi, a więc najbardziej pożądanymi wrażliwościami charakteryzuje się optymalny współczynnik mocy silnika, szczególnie przy wyższych prędkościach silnika i to wybór tej wielkości jako parametru optymalizacyjnego należy preferować. Brak gładkości krzywych wrażliwości spowodowany jest przyjętą definicją mocy rozwijaną przez napędy trakcyjne.

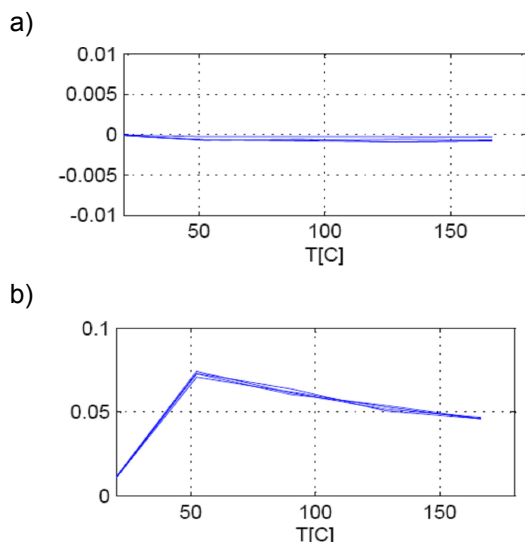


Rys. 8. Zależność optymalnego współczynnika mocy od częstotliwości napięcia stojana przy pracy na obwodni charakterystyk trakcyjnych

Ciekawą rzeczą jest zależność optymalnego współczynnika mocy od prędkości silnika, czyli w przybliżeniu od częstotliwości napięcia stojana. Zależność taką przedstawiono na rysunku 8. Tylko przy bardzo wymagających

napędach konieczne będzie uwzględnienie zmienności tego parametru. Dla większości przypadków można przyjąć, że wartość tego parametru jest stała. Przemawia też za tym bardzo płaski przebieg krzywych sprawności na charakterystykach roboczych silnika (rys. 3).

Wyznaczono również wrażliwość poszczególnych parametrów optymalizacyjnych na temperaturę uzwojeń wirnika. Przykładowy przebieg dla częstotliwości napięcia stojana pokazano na rysunku 9. Wzięto przy tym pod uwagę tylko zmianę temperatury uzwojeń wirnika, ponieważ w przypadku napędów przekształtnikowych rdzeń wirnika, a tym samym jego uzwojenie jest szczególnie mocno nagrzewane, nawet przy małych obciążeniach silnika na skutek odkształcenia krzywej napięcia. Przyczyną tego są straty pulsacyjne mocy w zębach wirnika.



Rys. 9. Wrażliwość: a) optymalnego współczynnika mocy, b) optymalnego poślizgu i optymalnej częstotliwości napięcia wirnika na zmiany temperatury uzwojeń wirnika dla częstotliwości napięcia stojana  $f = 55$  Hz

Jak widać, w tym przypadku również najmniejszą wrażliwością charakteryzuje się optymalny współczynnik mocy.

## 5. Wnioski

W przypadku napędów dużej mocy (do około kilkuset kilowatów) istnieje potencjalna możliwość oszczędności energii elektrycznej przez wybór punktu pracy napędu, optymalnego pod względem energetycznym przy obciążeniach mniejszych od znamionowego.

W przypadkach, których napięcie wyjściowe falownika jest mało odkształcone, a dodatkowe straty mocy w silniku spowodowane odkształ-

ceniem krzywej napięcia są pomijalnie małe, można stosować pośrednie metody regulacji optymalne pod względem energetycznym. W przypadku nowoczesnych napędów asynchronicznych, których hardware posiadają pewien zapas możliwości operacyjnych, jest możliwe wprowadzenie tego typu regulacji nawet bez dodatkowych nakładów inwestycyjnych. Wystarczy do tego celu odpowiednia modyfikacja software'u bez konieczności stosowania zewnętrznych, dodatkowych regulatorów, stanowiących oddzielne aparaty.

Przy pośredniej metodzie regulacji optymalnej pod względem energetycznym najlepiej jest przyjąć jako parametr optymalizacyjny współczynnik mocy silnika. Charakteryzuje on się stałą wartością przy danej częstotliwości napięcia stojana oraz małą wrażliwością na zmiany innych parametrów napędu. W przypadku napędów o małych zakresach regulacji można przyjąć, że dla całego zakresu zmienności częstotliwości stojana ma on wartość stałą. Ten sposób regulacji można zrealizować za pomocą prostych i tanich regulatorów do regulacji stałowartościowej.

## 6. Literatura

- [1]. Abrahamsen 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]. Banach H.: *Sprawność maksymalna indukcyjnego silnika klatkowego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 88, 2010, wyd. BOBRME Komel, s. 147-152.
- [3]. Edwards J. B., Eren H.: *Controlling electric traction drives for minimum energy wastage*. PROC. IEE, Vol. 126, No. 3, March 1979, s. 254-260
- [4]. Nise N. S.: *Control System Engineering*. 5<sup>th</sup> Edition, International Student Version. John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [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.

## Autorzy

mgr inż. Lech Lipiński  
 dr inż. Mirosław Miszewski  
 Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA  
 Holding, ul. Zygmunta Augusta 11  
 85-082 Bydgoszcz