

XV Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2005
Oddział Gdański PTETiS

**BADANIA SYMULACYJNE WPLYWU MODULACJI PRĄDU NA
PRZEBIEG MOCY CHWILOWEJ POBIERANEJ PRZEZ SILNIK
INDUKCYJNY DLA CELÓW DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK**

Lucjan WILCZEWSKI¹, Leon SWĘDROWSKI²

1. Politechnika Gdańska. Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 347-12-84 fax: 347-17-26 e-mail: lwilcz@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska. Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 347-12-84 fax: 347-17-26 e-mail: lswed@ely.pg.gda.pl

W referacie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu modulacji prądu na przebieg mocy chwilowej pobieranej przez silnik indukcyjny. Na prostym modelu zmiennej w czasie indukcyjności, zasymulowanym w PSpice, wyjaśniono uproszczony model zjawisk będących źródłem modulacji prądu i mocy chwilowej. Następnie zaprezentowano wyniki symulacji uzyskanych za pomocą przygotowanego w LabVIEW programu dla celów określenia wpływu kąta przesunięcia fazowego na amplitudę składowych diagnostycznych.

1. WSTĘP

Znane są z literatury metody diagnostyki łożysk oparte o analizę odkształceń prądu zasilającego silnik indukcyjny [1, 2 i 3]. Odkształcenia te mają postać nowych harmonicznych widma prądu, będących rezultatem modulacji składowych obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, harmonicznymi o częstotliwościach charakterystycznych dla danego uszkodzenia.

Metoda analizy widma prądu napotyka na trudności, związane z pomiarem składowych diagnostycznych, które są małe wobec składowych istniejących w widmie silnika bez uszkodzeń. Trudności sprawia także uzyskanie zgodności obliczonych częstotliwości poszukiwanych składowych z wynikami eksperymentu. Powszechnie przyjmowane są dwa modele zjawisk zachodzących w silniku, będących źródłem odkształceń prądu. Pierwszy z nich zakłada, że źródłem modulacji prądu są oscylacje szerokości szczeliny powietrznej, które skutkują zmieniającą się w czasie reaktancją indukcyjną szczeliny powietrznej. Drugi model zakłada, że odkształcenie prądu jest skutkiem zaburzeń momentu obciążenia silnika, spowodowanych zmiennym momentem oporowym uszkodzonego łożyska. Zaburzenia momentu powodują zaburzenia mocy pobieranej przez silnik.

Zatem uszkodzone łożysko skutkuje wahaniami mocy pobieranej ze źródła przez silnik, jak i nierównomiernością prędkości kątowej wirnika. Zmiany mocy przy napięciu wymuszonym przez źródło zasilania są przyczyną zmian wartości prądu zasilającego silnik.

2. MOC CHWILOWA JAKO PARAMETR REPREZENTATYWNY

Niezależnie od przyjętego modelu zaburzenia prądu objawiają się w postaci składowych harmonicznych będących rezultatem modulacji harmonicznych częstotliwości zawartych w widmie prądu stojana silnika niezależnie od uszkodzeń, przez częstotliwości charakterystyczne dla rodzaju uszkodzenia. Częstotliwości charakterystyczne wynikają z wymiarów geometrycznych łożyska i prędkości kątowej wirnika. Zależności, za pomocą których można określić częstotliwości charakterystyczne podane są m.in. w publikacjach [1] i [2].

Przyjmując zatem wymuszone napięcie według zależności:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

i prąd zmodulowany w postaci:

$$i_M(t) = i(t)[1 + M_m \sin(\omega_u t)], \quad (2)$$

gdzie: M_m – amplituda składowej modulującej o częstotliwości ω_u ,
 ω_u – pulsacja składowej o częstotliwości charakterystycznej dla rodzaju uszkodzenia,
 $i(t)$ – niezmodulowany przebieg czasowy prądu $i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$,

można moc chwilową opisać następującą zależnością:

$$p_M(t) = u(t) \cdot i_M(t) = p(t)[1 + M_m \sin \omega_u t] = UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] + \sqrt{2}MIU \left[\frac{1}{2} \sin(2\omega t - \omega_u t - \varphi) - \frac{1}{2} \sin(2\omega t + \omega_u t - \varphi) + \cos \varphi \sin(\omega_u t) \right] \quad (3)$$

Z zależności (3) wynika, że w przypadku zmodulowania prądu częstotliwościami charakterystycznymi ω_u moc chwilowa będzie zawierała składowe:

- stałą $UI \cos \varphi$ i zmienną $UI \cos(2\omega t - \varphi)$, takie same jak w przypadku niezmodulowanej mocy chwilowej
- zmienne o częstotliwościach będących rezultatem modulacji składowych harmonicznych niezmodulowanej mocy chwilowej przez częstotliwość charakterystyczną ω_u . Składowe te mają częstotliwości równe sumie $2\omega t + \omega_u$ i różnicy $2\omega t - \omega_u$
- zmienną o częstotliwości ω_u , której amplituda zależy od przesunięcia fazowego prądu względem napięcia.

Można dalej rozpatrzyć ogólny przypadek, w którym napięcie zasilające silnik ma postać:

$$u(t) = \sum_{k=1}^n a_k U_m \sin(k\omega t - \varphi_k), \quad (4)$$

a zmodulowany prąd ma postać:

$$i_M(t) = \sum_{l=1}^p b_l I_m \sin(l\omega t - \varphi_l - \alpha_l) \cdot [1 + M_m \sin \omega_u t]. \quad (5)$$

Wówczas moc chwilową można opisać ogólną zależnością:

$$p(t) = UI \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^p a_k b_l \begin{bmatrix} \cos((k-l)\omega t - \varphi_k + \varphi_l + \alpha_l) + \\ - \cos((k+l)\omega t - \varphi_k - \varphi_l - \alpha_l) \end{bmatrix} + \\ + UIM_m \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^p a_k b_l \begin{bmatrix} \sin(\omega_u t + (k-l)\omega t - \varphi_k + \varphi_l + \alpha_l) + \\ + \sin(\omega_u t - (k-l)\omega t + \varphi_k - \varphi_l - \alpha_l) + \\ - \sin(\omega_u t + (k+l)\omega t - \varphi_k - \varphi_l - \alpha_l) + \\ - \sin(\omega_u t - (k+l)\omega t + \varphi_k + \varphi_l + \alpha_l) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

gdzie: φ_k, φ_l – przesunięcie fazowe między harmoniczną podstawową a harmoniczną k -tą (l -tą), przy czym zachodzi $\varphi_k = \varphi_l$ dla $k = l$,
 α_l – przesunięcie fazowe prądu względem napięcia dla l -tej harmonicznej,
 a_k, b_l – stosunek wartości amplitudy k -tej (l -tej) harmonicznej do wartości amplitudy harmonicznej podstawowej.

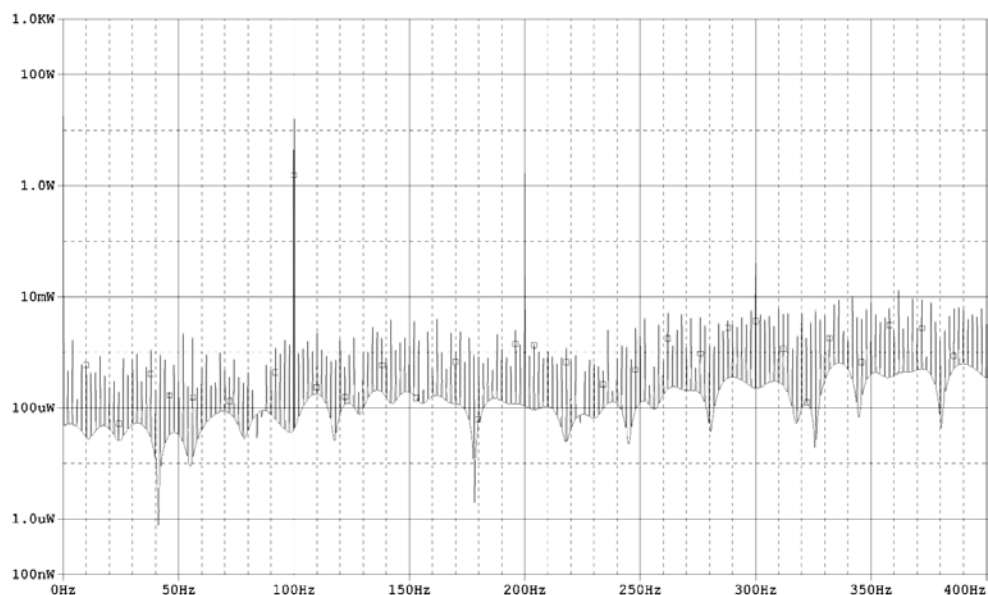
Oprócz składowych będących rezultatem modulacji przez częstotliwości charakterystyczne ω_u harmonicznym obecnych w widmie mocy chwilowej pobieranej przez silnik (a tym samym również obecnych w widmie prądu zasilającego silnik), pojawiają się składowe o częstotliwości równej częstotliwości ω_u charakterystycznej dla danego rodzaju uszkodzenia. Obecność tych składowych oraz ich wartość posłużyć mogą za parametr reprezentatywny dla oceny stanu łożysk w silniku indukcyjnym.

3. BADANIA SYMULACYJNE

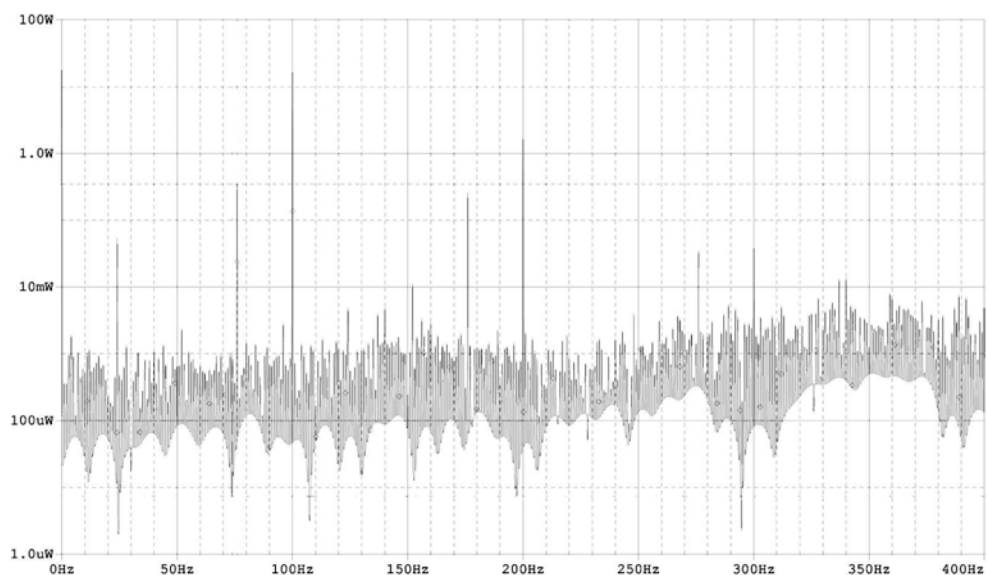
3.1. Symulacja wpływu zmiennej w czasie indukcyjności na moc chwilową

Celem potwierdzenia założeń modelu, w którym źródłem oscylacji jest zmienna w czasie reaktancja indukcyjna szczeliny powietrznej, przeprowadzona została w pakiecie PSpice symulacja prostego obwodu RL zasilanego ze źródła napięcia przemiennego o indukcyjności składającej się ze składowej stałej i składowej zmiennej w czasie wg zależności $L(t) = L_0(1 + a \sin \omega t)$, gdzie stała a jest miarą udziału amplitudy składowej zmiennej. Dla porównania przeprowadzono też symulację dla indukcyjności złożonej tylko ze składowej stałej w czasie.

Na rysunku 1 przedstawiono widmo mocy chwilowej będące wynikiem symulacji dla przypadku indukcyjności stałej w czasie. Wyraźnie widoczne są harmoniczne o częstotliwościach 100Hz, 200Hz i 300Hz. Składowa 100Hz jest sumą trzech składowych o częstotliwościach $\omega + \omega$, $3\omega - \omega$ i $|\omega - 3\omega|$. Składowa 200Hz jest sumą dwóch składowych o częstotliwościach $\omega + 3\omega$ i $3\omega + \omega$. Składowa 300Hz to składowa o częstotliwości $3\omega + 3\omega$.



Rys. 1. Widmo mocy chwilowej uzyskane w symulacji w programie PSpice dla przypadku obwodu RL z indukcyjnością stałą w czasie



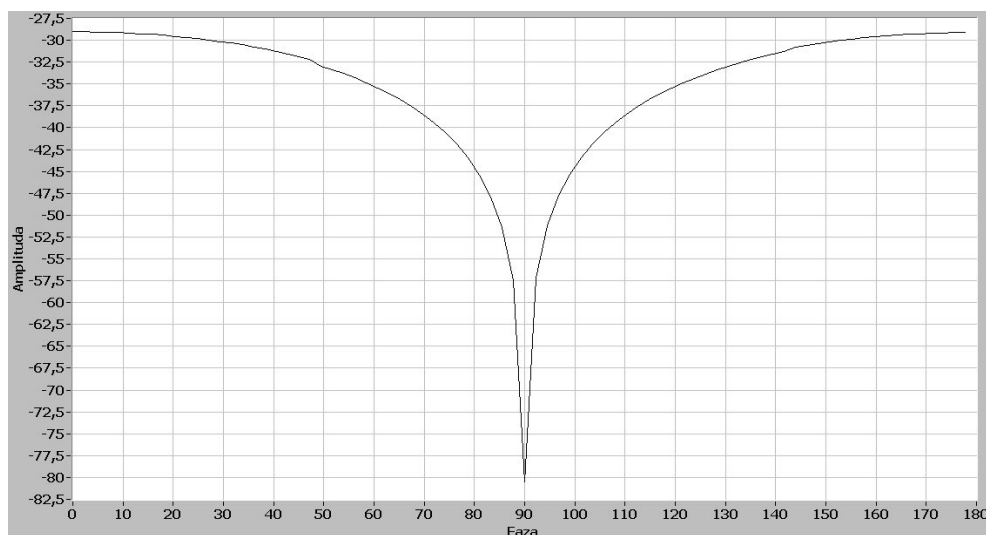
Rys. 2. Widmo mocy chwilowej uzyskane w symulacji w programie PSpice dla przypadku obwodu RL z indukcyjnością zmieniającą się w czasie z częstotliwością 76Hz

Po wprowadzeniu do obwodu składowej zmiennej indukcyjności uzyskano widmo mocy chwilowej przedstawione na rysunku 2. Można zauważyć, że oprócz obecnych w widmie na rysunku składowych o częstotliwościach 100Hz, 200Hz i 300Hz pojawiły się nowe harmoniczne o częstotliwościach 24Hz, 76Hz, 124Hz, 152Hz, 176Hz, 276Hz.

Składowe 76Hz i 152Hz to pierwsza i druga harmoniczna częstotliwości wprowadzonej oscylacji składowej zmiennej indukcyjności. Składowe 24Hz i 176Hz to składowe odpowiednio $\omega - \omega_u$ i $\omega + \omega_u$. Składowe 124Hz i 276Hz to składowe odpowiednio $2\omega - \omega_u$ i $2\omega + \omega_u$. Składowe wyznaczone ze wzoru (6), pokrywają się ze zlokalizowanymi w uzyskanym z symulacji widmie. Nerozróżnialne są jedynie składowe będące skutkiem modulacji składowej o częstotliwości 300Hz, co jest skutkiem jej małej amplitudy w porównaniu z pozostałymi dwiema składowymi.

3.2. Badanie wpływu kąta przesunięcia fazowego na widmo mocy chwilowej

Zależności matematyczne (3) i (6) opisujące moc chwilową w przypadku modulacji harmonicznymi o częstotliwości charakterystycznej dla rodzaju uszkodzenia łożyska, wskazują na zależność amplitudy składowej o częstotliwości charakterystycznej od kąta przesunięcia fazowego między napięciem i prądem. Na rysunku 3 przedstawiono wynik symulacji zrealizowanej w środowisku LabVIEW, której celem było zbadanie wpływu kąta przesunięcia fazowego na amplitudę składowej o częstotliwości charakterystycznej dla rodzaju uszkodzenia łożyska.



Rys.3. Zależność amplitudy składowej harmonicznej o częstotliwości charakterystycznej dla rodzaju uszkodzenia łożyska od kąta przesunięcia fazowego między prądem a napięciem

Amplituda harmonicznej o częstotliwości charakterystycznej zależy od cosinusa kąta przesunięcia fazowego między prądem a napięciem. Oznacza to, że dla kąta 90° amplituda tej składowej harmonicznej równa jest zero. Na rysunku 3 minimum jest na poziomie -78dB, ze względu na obecny w symulowanym sygnale szum. Widać zatem, że w pomiarach diagnostycznych niekorzystnym z punktu widzenia lokalizacji harmonicznymi diagnostycznych jest przypadek przesunięcia fazowego między prądem a napięciem o wartości pomiędzy 70° a 110° , a optymalnym przypadkiem byłby brak przesunięcia fazowego między prądem a napięciem. W praktyce zadawalającym byłoby przesunięcie fazowe od 0° do 50° w którym spadek amplitudy wynosi 3 dB.

4. PODSUMOWANIE

Niezależnie od przyjętego modelu zjawisk zachodzących w silniku pojawienie się uszkodzeń w łożysku skutkuje zaburzeniami mocy chwilowej pobieranej przez silnik. Zaburzenia mocy chwilowej objawiają się w widmie mocy chwilowej w postaci składowych harmonicznych o częstotliwościach charakterystycznych dla rodzaju uszkodzeń. Składowe te mogą posłużyć do określenia sygnatury diagnostycznej pozwalającej ocenić stan łożysk silnika indukcyjnego. W porównaniu do diagnostyki prądowej sposób ten pozwala na zredukowanie liczby poszukiwanych w widmie mocy chwilowej składowych niosących informację diagnostyczną, do harmonicznych składowych o częstotliwościach charakterystycznych dla rodzaju uszkodzenia. Ponadto określenie częstotliwości charakterystycznych dla rodzaju uszkodzenia wymaga mniejszej liczby obliczeń pośrednich, niż określenie częstotliwości składowych będących rezultatem modulacji składowymi o częstotliwości charakterystycznej. Tym sposobem otrzymane wartości częstotliwości bliższe są wartościom częstotliwości obecnym w rzeczywistym widmie.

Metoda oparta na przedstawionych zależnościach jest treścią zgłoszenia patentowego [4].

Badania symulacyjne potwierdziły zależności (3) i (6) oraz wykazały znaczący wpływ kąta przesunięcia fazowego na amplitudę składowych o częstotliwościach charakterystycznych. Wpływ ten można wykorzystać celem „wzmocnienia” amplitudy tych składowych, wykorzystując jako parametr reprezentatywny iloczyn przebiegów wartości chwilowych prądu i napięcia i dopasowując te przebiegi tak, by kąt przesunięcia fazowego między harmoniczną podstawową prądu i harmoniczną podstawową napięcia był bliski zeru.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Schoen R.R., Habetler T.G., Kamran F., Bartheld R.G. “Motor bearing damage detection using stator current monitoring,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, pp.1274-1279, No. 6, Nov/Dec 1995
2. Stack J.R., Habetler T.G., Harley R.G. „Bearing fault detection via autoregressive stator current modeling,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol.40, pp.740-747, No. 3, May/June 2004
3. Swędrowski L., „Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Monografie nr 54, Gdańsk 2005
4. Wilczewski L., “Sposób przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk silnika indukcyjnego”, Zgłoszenie patentowe nr P 374131

COMPUTER BASED RESEARCH OF CURRENT MODULATION INFLUENCE ON INSTANTANEOUS POWER SUPPLYING INDUCTION MOTOR FOR PURPOSE OF ROLLING BEARING DIAGNOSTIC

Results of computer based research of current modulation influence on instantaneous power supplying induction motor is presented in this paper. Simulation of simple RL circuit with oscillating inductance is used to confirm one of simple models of phenomenons occurring in induction motor with damaged rolling bearing. Next, results of research of influence of phase angle between current and voltage on amplitude of diagnostic signature components is presented.