

Jerzy Hickiewicz, Politechnika Opolska, Opole
Zbigniew Ławrowski, Grzegorz Sikora, Energotest – Diagnostyka, Opole

ZWARCIE UDAROWE JAKO DIAGNOSTYCZNA METODA POBUDZANIA DO DRGAŃ SILNIKA INDUKCYJNEGO

SHORT CIRCUIT SHOCK METHOD APPLIED TO INITIATE VIBRATION OF AN INDUCTION MOTOR

Abstract: The study paper describes dynamic mathematical model of an induction motor. This model has been applied to simulate investigations and to calculate a peak value of electromagnetic torque during short circuit shock. Also presented are results of experiment investigations of a high power induction motor vibration, which has been initiated by a short circuit shock method. The measurement results of vibration when using two other methods are included. Consistence of measurement results proves suitability of a short circuit shock method to be applied to vibration testing of an induction motor.

1. Wstęp

Metoda diagnostyczna wykorzystująca zwarcie udarowe silnika jako elektromechaniczne pobudzenie wewnętrzne pozwala wykryć i zarejestrować wszystkie pojawiające się drgania elementów wewnątrz silnika, często o charakterze rezonansowym, które mogą być oznaką różnego rodzaju uszkodzeń mechanicznych. Przykładem tych uszkodzeń mogą być: luźne upakowanie żelaza czynnego, luźne mocowanie żelaza czynnego stojana z obudową silnika, wszelkiego rodzaju pęknięcia w obudowie silnika, złe mocowanie wału silnika w klatce wirnika, wadliwe posadowienie łożysk w gniazdach łożyskowych silnika, itp.

Diagnostyczne zwarcie udarowe w silniku indukcyjnym polega na tym, że silnik pracujący w ustalonym stanie jałowym, umieszczony na odpowiedniej płycie fundamentowej zostaje odłączony od sieci zasilającej i po bardzo krótkiej przerwie (rzędu 20÷30ms) zaciski silnika zostają ze sobą zwarte. W wyniku nie stłumionego pola elektromagnetycznego powstają w uzwojeniach stojana i klatce wirnika prądy o wartościach przekraczających kilkakrotnie wartości znamionowe, co z kolei wytwarza trwający krótko, ale o dużej wartości, moment elektromagnetyczny, działający hamująco na wirnik. Wywołuje on bardzo duże chwilowe pobudzenie mechaniczne silnika. Pobudzenie to wywołuje w silniku drgania w różnych elementach składowych silnika. Zarejestrowanie drgań na szybkim rejestratorze drgań, a następnie przeprowadzenie ich analizy, umożliwia uzyskanie informacji o stanie mechanicznym silnika. Szczególnie dużą wartość diagnostyczną

posiadać może porównywanie wyników takich badań, wykonywanych co pewien okres, poczynając od pierwszych badań wykonanych przed zainstalowaniem silnika na stanowisku pracy. Zmiany, które po pewnym okresie eksploatacji silnika, mogą uwidocznić się w widmie drgań pozwalają sygnalizować powstające uszkodzenie w silniku.

2. Model matematyczny silnika indukcyjnego i badania symulacyjne

Istnieje możliwość pomiarowej weryfikacji przebiegów prądów w trakcie zwarcia udarowego, często jednak brakuje możliwości wykonania pomiaru przebiegu elektromagnetycznego momentu hamującego powstającego podczas zwarcia udarowego. Zachodzi zatem potrzeba wykonania badań symulacyjnych zwarcia udarowego oraz poprzedzającego go swobodnego wybiegu nieobciążonego silnika w celu obliczeniowego określenia wartości hamującego momentu elektromagnetycznego jakie mogą wystąpić w poszczególnych przypadkach zwarć, to znaczy przy różnych wartościach napięć resztkowych jak i ich kątów fazowych. W celu wykonania badań symulacyjnych wykorzystano model matematyczny [1][2][3] silnika indukcyjnego trójfazowego dużej mocy, który był już wielokrotnie używany do dynamicznych obliczeń symulacyjnych, sprawdzających poprawność doboru silników napędzających urządzenia potrzeb własnych elektrowni. Przy sformułowaniu modelu matematycznego silnika indukcyjnego przyjęto założenia: budowy symetrycznej silnika, liniowości charakterystyki

magnesowania, sinusoidalnego rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej, pominięto straty w rdzeniu magnetycznym, przyjęto dwuosiową transformację obwodów wirnika w układzie współrzędnych nieruchomych względem stojana, oraz następującą macierz transformacji poszczególnych wielkości wirnika

$$[T_w] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \varphi & \cos(\varphi + 120) & \cos(\varphi - 120) \\ \sin \varphi & \sin(\varphi + 120) & \sin(\varphi - 120) \end{bmatrix},$$

w której φ oznacza kąt obrotu wirnika względem stojana.

Uzyskany w wyniku transformacji obwodów wirnika dynamiczny model matematyczny silnika składa się z równań opisujących obwody elektryczne silnika

$$[U] = \frac{d[\Psi]}{dt} + [\Omega(\varphi)][\Psi] + R[I] \quad (1)$$

zależności pomiędzy strumieniami magnetycznymi, a odpowiednimi prądami

$$[\Psi] = [L][I] \quad (2)$$

oraz równanie ruchu

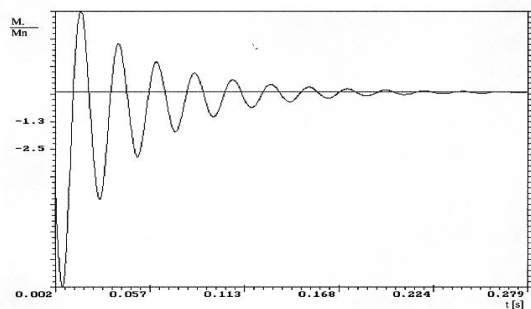
$$\frac{J}{p} \frac{d\varphi}{dt} = M_e - M_m \quad (3)$$

w którym moment elektromagnetyczny określony jest zależnością

$$M_e = \frac{3}{2} p I_m \{ \Psi_s^x I_s \} \quad (4)$$

W celu sprawdzenia jaki wpływ na wartość maksymalną momentu, ma czas wybiegu silnika, tzn. czas po którym wykonane zostaje zwarcie udarowe, liczony od momentu wyłączenia napięcia zasilania, wykonano [4] obliczenia symulacyjne zwarć udarowych silnika typu SZJre-134t o mocy 1000kW i napięciu 6kV.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przebieg momentu elektromagnetycznego przy zwarciu udarowym, a wpływ czasu wybiegu na kierunek i wartość szczytową przebiegu momentu elektromagnetycznego, przy zachowaniu jednoczesności styków łącznika realizującego zwarcie przedstawiono w tabeli nr 1.



Rys. 1. Elektromagnetyczny moment przy zwarciu udarowym silnika (obliczeniowy)

Tab.1

Zależność udarowego momentu elektromagnetycznego przy zwarciu od czasu wybiegu

Lp.	T_{wyb} [ms]	T_{mx} [ms] czas pojaw. się Mx momentu	$\frac{M_{mx}}{M_n}$
1	18	3,57	-9,85
2	92	3,47	-9,12
3	196	3,43	-8,31
4	470	3,54	-6,6482
5	916	3,43	-4,5797

Wynika z niej, że wartość szczytowa momentu maleje ze wzrostem czasu wybiegu poprzedzającego zwarcie, natomiast kierunek pierwszego impulsu momentu jest zawsze ujemny. Czas wystąpienia szczytowej wartości momentu jest praktycznie stały, waha się w granicach od 3,43 do 3,62ms.

Tabela nr 2 przedstawia wpływ niejednoczesności styków łącznika zwierającego na kierunek i wartość pierwszego impulsu momentu.

Tab. 2.

Zależność wielkości momentu udarowego od niejednoczesności styków

Lp.	T_{wyb} [ms]	T_{niejed} [ms]	T_{mx} [ms] czas pojawienia się Mx momentu	$\frac{M_{mx}}{M_n}$
1	2	3	4	5
1	102	0,0	3,7	-8,67
2		2,0	5,67	-6,90
3	160	0,0	3,54	-8,14
4		2,0	4,06	-5,25
5	220	0,0	3,64	-7,72
6		2,0	5,60	-6,10
7	426	0,0	3,56	-7,50
8		2,0	4,62	-6,44

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w miarę powiększania się czasu niejednoczesnego załączenia styków, wydłuża się czas, po którym wys-

tępuje szczytowa wartość pierwszego impulsu, natomiast kierunek tego impulsu jest zawsze ujemny. Wartość szczytowa pierwszego udaru zmniejsza się w granicach od 10 do 20 %.

3. Wyniki badań eksperymentalnych

Energotest–Diagnostyka dysponuje stacją prób która wyposażona jest w zespół prądowców złożony z generatora synchronicznego o mocy 1,2MVA, napięciu 6kV napędzanego silnikiem prądu stałego w przekształtnikowym układzie Leonarda, umożliwiającym płynne nastawianie częstotliwości generatora. Ponadto stacja prób dysponuje też płytą (której częstotliwości własne są poza zakresem pomiarowym) na wydzielonym fundamencie o łącznej masie 150 ton. Rysunek 2 przedstawia widok płyty podczas pomiaru momentu rozruchowego, a rysunek 3 w trakcie pomiarów obciążenia silników, metodą pracy zwrotnej.



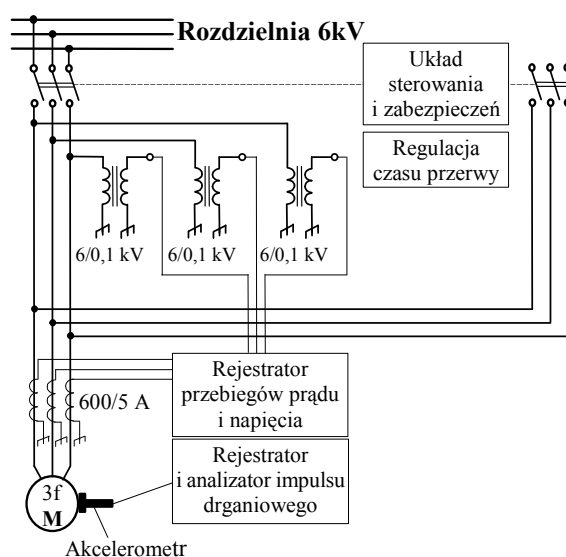
Rys. 2. Stanowisko do pomiarów silników elektrycznych dużej mocy na płycie pomiarowej w trakcie pomiaru momentu rozruchowego silnika



Rys. 3. Próba obciążenia silników 1MW, 6kV metodą pracy zwrotnej, na stanowisku pomiarowym

Biorąc pod uwagę możliwości, które stwarzało wyposażenie stacji prób zdecydowano się przeprowadzić badania drgań silnika na tym stanowisku metodą zwarcia udarowego.

Metoda zwarcia udarowego jest metodą nowatorską. Stacja prób dysponuje układem szybkich łączników umożliwiających jego bezpieczną realizację. Pobudzenia tą metodą do drgań umożliwia obserwację dynamiki silnika w szerokim zakresie, praktycznie bez ograniczeń. Na rysunku 4 przedstawiono schemat połączeń układu do pomiarów w trakcie zwarcia udarowego silnika.



Rys. 4. Schemat połączeń rozdzielni do wykonania zwarcia udarowego



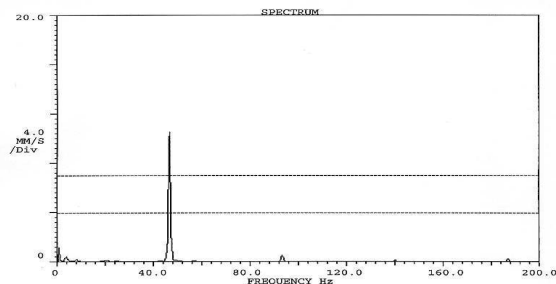
Rys. 5. Rozdzielnia z polem rewersyjnym

Rysunek 5 przedstawia rozdzielnię, a rys. 6 zworę umożliwiającą wykonanie zwarcia udarowego uzwojeń stojana. W czasie prób zwarcia udarowego mierzono wartości prędkości drgań i zdjęto charakterystyki widma. Wszystkie pomiary dokonano analizatorem dwukanałowym [5]. Wykonano pomiary silnika dużej mocy

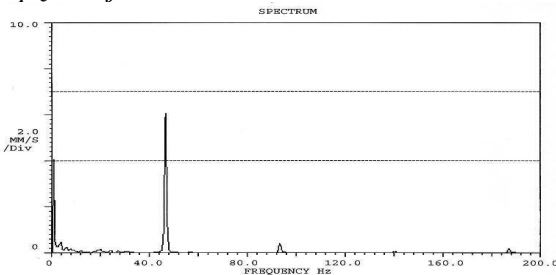
o liczbie par biegunów $p=1$, a przykładowe widma prędkości drgań przedstawiono na rysunkach 7 oraz 8.



Rys. 6. Zwoła umożliwiająca wykonanie zwarcia udarowego



Rys. 7. Widmo prędkości drgań badanego silnika, przy zwarciu udarowym, pomiar od strony napędowej D

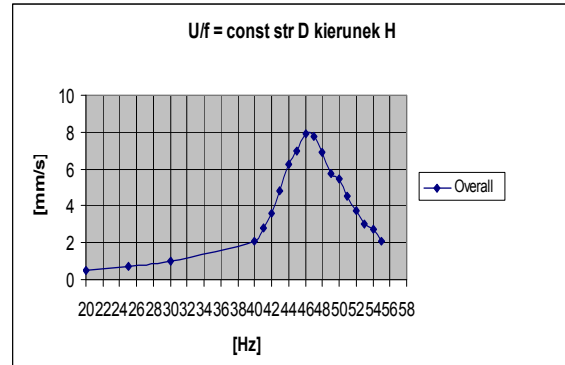


Rys. 8. Widmo prędkości drgań badanego silnika przy zwarciu udarowym, pomiar od strony przeciwnapędowej ND

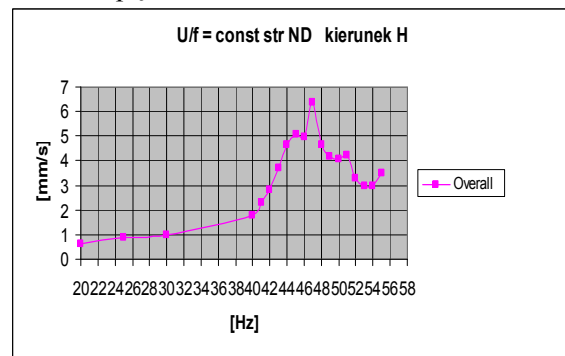
Z wyników pomiarów wykonanych zarówno po stronie napędowej jak i przeciwnapędowej widać, że silnik wzbudza się przy częstotliwości 47,1 Hz.

W celu eksperymentalnego sprawdzenia tej metody, wykonano pomiary drgań tego samego silnika dwiema innymi metodami. Wykorzystując możliwości jakie stwarza przetwornica częstotliwości, stanowiąca wyposażenie stacji prób, zmierzono charakterystyki prędkości drgań silnika w funkcji częstotliwości napięcia zasilania, przy stałym stosunku wartości napię-

cia do częstotliwości, $v=f(f)$ przy $U/f=U_N/f_N$ w trzech kierunkach V, H, i A. Na rysunkach nr 9 i 10 przedstawiono charakterystyki zmierzone od strony napędowej D w kierunku H i przeciwnapędowej ND też w kierunku H.



Rys. 9. Charakterystyka $v=f(f)$ przy $U/f=const$ strona napędowa, kierunek H

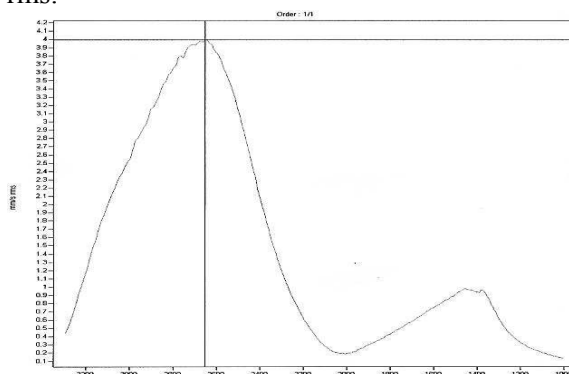


Rys. 10. Charakterystyka $v=f(f)$ przy $U/f=const$, strona przeciwnapędowa, kierunek H

Z powyższych wykresów wynika, że zarówno od strony napędowej jak i przeciwnapędowej drgania wyraźnie wzrastają w zakresie częstotliwości od 42 Hz do 52 Hz i to potwierdza wzrost wartości prędkości drgań badanego silnika przy znamionowej prędkości. Podobne rezultaty pomiarowe uzyskano dla pozostałych dwóch kierunków V i A.

Występowanie dużych wartości prędkości drgań przy prędkości zbliżonej do znamionowej postanowiono zbadać jeszcze jedną metodą. Dzięki możliwości zasilania badanego silnika z generatora synchronicznego o nastawianej częstotliwości zasilono silnik napięciem o częstotliwości nieco większej od znamionowej ($f=1,1f$, przy $U/f=U_N/f_N$) i po uzyskaniu przez silnik prędkości wirowania większej od znamionowej odłączono go od źródła zasilania. Przez cały czas wybiegu były dokonywane pomiary prędkości obrotowej wału i wartości prędkości drgań przy pomocy analizatora drgań [6]. Na rysunku nr 11 przedstawiono tę charak-

terystykę. Na jej przebiegu można zauważyć początkowo znaczny wzrost wartości prędkości drgań, a następnie szybkie zmniejszanie wartości. Największa wartość prędkości drgań występuje przy 2670 obr/min i wynosi 3,99 mm/s rms.



Rys. 11. Pomiar prędkości drgań podczas swobodnego wybiegu

Ponieważ silnik podczas pomiarów nie był zasilany, a pozostawał w nim jedynie zanikający strumień magnetyczny, można przypuszczać, że znaczny wzrost prędkości drgań nie jest pochodzenia magnetycznego tylko mechanicznego. Pomiar podczas wybiegu pozwala obserwować zachowanie się silnika przy różnych prędkościach, ale górną granicą jest prędkość wirowania wynikająca z częstotliwości napięcia zasilania silnika.

4. Podsumowanie

Przedstawiono porównawczo wyniki pomiarów drgań silnika, o liczbie par biegunów $p=1$, pobudzonego do drgań trzema różnymi metodami. Uzyskano dobrą zgodność wyników pomiarowych. Potwierdza to poprawność metody pomiaru drgań silnika pobudzonego do drgań zwarcie udarowym. Metoda ta wymaga co prawda dysponowaniem odpowiednią płytą fundamentową i możliwości precyzyjnego sterowania czasem wywołania zwarcia udarowego, ale pozwala na obserwację dynamiki silnika w największym zakresie częstotliwości. Badania dały też podstawę do ewentualnej analizy przyczyn drgań i sposobów ich zmniejszenia. Można przypuszczać, że przyczyną dużych wartości drgań przy prędkościach około 2670 obr/min jest najprawdopodobniej rezonans, a nie jak to wcześniej przypuszczano niewyważenie wirnika.

Literatura

[1]. Hickiewicz J. i inni: Praca n-b pt. „Sprawdzenie pod względem dynamicznym poprawności doboru napędów potrzeb własnych Elektrowni Opole, etap

I: Wyznaczenie parametrów modeli dynamicznych wytypowanych silników Elektrowni Opole, skatalogowanie parametrów”. Praca wykonana na zlecenie Elektrowni Opole, czerwiec 1987.

[2]. Hickiewicz J. i inni: Praca n-b pt. „Sprawdzenie pod względem dynamicznym poprawności doboru napędów potrzeb własnych Elektrowni Opole, etap II: Wykonanie obliczeń sprawdzających I części napędów potrzeb własnych Elektrowni Opole”. Praca wykonana na zlecenie Elektrowni Opole, listopad 1987.

[3]. Hickiewicz J. i inni: Praca n-b pt. „Sprawdzenie pod względem dynamicznym poprawności doboru napędów potrzeb własnych Elektrowni Opole, etap III: Wykonanie obliczeń sprawdzających II części napędów potrzeb własnych, obliczenia sprawdzające systemu po wypadnięciu bloku”. Praca wykonana na zlecenie Elektrowni Opole, listopad 1988.

[4]. Ławrowski Z.: „Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce na przykładzie Elektrowni Opole” Rozprawa doktorska Pol. Śl. Gliwice 1999 r.

[5]. Instrukcja obsługi analizatora drgań CMVA 40 firmy SKF. Rok wyd. 1995 SKF

[6]. Instrukcja obsługi analizatora drgań Vibrotest 60 firmy Schenck. Rok wyd. 1998 Schenck

Autorzy

Dr hab. Jerzy Hickiewicz

Prof. w Politechnice Opolskiej

jh@po.opole.pl

Dr inż. Zbigniew Ławrowski

zbigniew.lawrowski@elopole.bot.pl

Mgr inż. Grzegorz Sikora

gsikora@energotest-diagnostics.pl

Energotest-Diagnostics Opole