

Józef Strycharz
AGH Kraków

O MOŻLIWOŚCI Wczesnego wykrywania pęknięć prętów klatki wirnika podczas pracy maszyny asynchronicznej

ABOUT CAGE BARS CRACK EARLY DISCOVERING POSSIBILITY DURING INDUCTION MOTOR WORK

Abstract: Some utilizing possibilities of induction motor stator phase current vector function hodographs as diagnostic signals to rotor cage bars (rings) ruptures early discovering during machine work have been described in the paper. As a result of rotor asymmetry, caused by cage bars ruptures, some $(1 \pm 2ks)f$ frequency band currents are induced in the stator, which are overlapping current base frequency ($f=50\text{Hz}$) component. In cases of rotor damages, hodograph course is deformed, comparing to not damaged motor hodograph course. Hodograph deformations, characteristic for rotor bar ruptures have been illustrated by a lot of oscillograph records received during laboratory investigations. These investigations have been carried out for damaged motor feeding cases by voltages from power network and from voltage frequency changers. Hodograph deformations characteristic features for rotor bars damage cases are also seen during simultaneous appearance of other disturbances as, for example, impedance asymmetry in one of phases or feeding voltages. It's properly to remark that with the number of ruptured bars the diagnostic signal value and its pulsation can diminished and even lesser values can be received then for little number of ruptured bars. For this reason it's useful to carry out the best continuous or from time to time cage bars control (monitoring), because it permits to discover damages already in initial stadium and by this to exclusion next bar damages and serious machine damages appearance. Diagnostic method proposed should be numbered to non invaded methods. In the solution, which is based on observation and evaluation of motor stator phase current hodographs, could be approved generally machine current measuring system which exist in industrial systems.

1. Wstęp

Od lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia, w kraju i poza jego granicami, pojawiło się wiele opracowań dotyczących różnych metod badań diagnostycznych klatek wirników silników asynchronicznych. Różnorodność metod wynika z konieczności dostosowania ich do warunków, w jakich dokonuje się diagnozowania klatek wirników. Ogólnie, metody te można zaliczyć do jednej z dwu grup w zależności od tego czy do przeprowadzanych badań diagnostycznych dostępny jest sam wirnik, czy też wyłączona bądź będąca w eksploatacji maszyna asynchroniczna.

We współczesnych rozwiązaniach urządzeń pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych, przy wzrastającym poziomie automatyzacji procesów technologicznych, stawia się wymagania zapewnienia bieżącej kontroli stanów pracy stosowanych układów napędowych. Stąd, dające się zauważyć w niektórych publikacjach od lat osiemdziesiątych, ukierunkowanie badań na opracowanie metod umożliwiających wczesne wykrywanie uszkodzeń wirnika podczas eksploatacji maszyny.

2. Nośniki informacji o stanie klatki

Omawiane w różnych opracowaniach metody badań umożliwiają wykrywanie pęknięć prętów klatki wirnika przy wykorzystaniu różnych symptomów towarzyszących tego typu uszkodzeniom. Z praktyki eksploatacyjnej silników asynchronicznych klatkowych wiadomo, że dość wyraźnymi oznakami pęknięcia prętów klatki wirnika są pulsacje mocy czynnej, wahania momentu i prędkości obrotowej, pulsacje fazowych prądów stojana oraz pulsacje wydzielonej trzeciej harmonicznej prądu stojana. Z tematycznie związanych publikacji oraz opisów patentowych wynika, że w większości opracowań, do diagnostyki stanu klatki wirnika silnika w czasie jego eksploatacji, proponuje się wykorzystanie fazowych prądów stojana lub wydzielonej składowej o częstotliwości $(1-2s)f$ jako sygnałów diagnostycznych.

Według rozważań przeprowadzonych w [1], na skutek spowodowanej pęknięciami prętów niesymetrii wirnika pojawiają się składowe prądów stojana o częstotliwościach w pasmach $(1 \pm 2ks)f$. Składowe tych prądów o częstotliwościach odpowiadających większym wartościom

k , są silnie tłumione i stąd w rozważaniach wystarczy uwzględnić tylko składowe o częstotliwościach $(1 \pm 2s)f$. Z przeprowadzonych rozważań wynika również, że wartości amplitud prądów tych składowych są w przybliżeniu jednako-

$$I_{(1-2s)f} \cong I_{(1+2s)f}$$

gdzie: f – częstotliwość napięć stojana,
 s – poślizg.

W opracowaniu [4] przedstawiono, zweryfikowane pomiarami laboratoryjnymi, wyniki obliczeń sygnału diagnostycznego w postaci składowej prądu stojana o częstotliwości $(1-2s)f$ dla maszyn z uszkodzoną klatką wirnika. Przedstawione wyniki pozwalają na liczbową ocenę wartości tej składowej, co jest przydatne w modelowaniu matematycznym uszkodzeń w wirnikach maszyn asynchronicznych.

W pracy [2] omówiono wyniki obliczeń i analiz procesów w maszynie asynchronicznej w przypadkach uszkodzeń klatki wirnika na podstawie, których wyprowadzony jest wniosek, iż najbardziej nośnym pod względem informacyjnym, charakteryzującym uszkodzenie prętów wirnika klatkowego jest czasowy przebieg wypadkowego wektora (funkcji wektorowej) prądów stojana $\underline{i}_s(i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t))$, którego moduł:

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2)}.$$

W przypadku wystąpienia pęknięć prętów klatki wirnika, indukowane w stojanie prądy o częstotliwościach w pasmach $(1 \pm 2ks)f$, nakładając się na składową prądu o częstotliwości podstawowej $f=50\text{Hz}$, występować mogą w zgodnej lub przeciwnej fazie względem składowej podstawowej. Na ekranie oscyloskopu obserwuje się wtedy widoczne zwiększanie lub obniżanie wartości amplitudy czasowego przebiegu wypadkowego wektora prądów $\underline{i}_s(t)$.

3. Hodografy jako sygnały diagnostyczne

Przyjmijmy zasilanie maszyny napięciami sinusoidalnymi oraz wystąpienie pęknięć prętów klatki wirnika. Uwzględniając tylko pierwsze składowe $(1 \pm 2s)f$ fazowych prądów stojana z wyższego i niższego pasma częstotliwości $(1 \pm 2ks)f$ oraz, wspomniane wyżej, szacunkowe oceny wartości amplitud prądów tych składowych, można określić teoretyczne przebiegi prądów w fazach:

$$i_a = I \sin \omega t + I_{fn} \sin((1-2s)\omega t - \alpha_{fn}) + I_{fw} \sin((1+2s)\omega t - \alpha_{fw}),$$

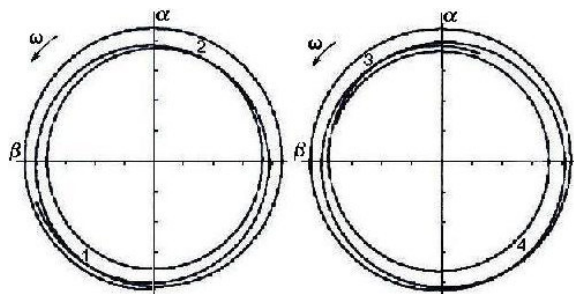
$$i_b = I \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_{fn} \sin((1-2s)\omega t - \frac{2\pi}{3} - \alpha_{fn}) + I_{fw} \sin((1+2s)\omega t - \frac{2\pi}{3} - \alpha_{fw}),$$

$$i_c = I \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + I_{fn} \sin((1-2s)\omega t - \frac{4\pi}{3} - \alpha_{fn}) + I_{fw} \sin((1+2s)\omega t - \frac{4\pi}{3} - \alpha_{fw}),$$

gdzie: I, I_{fn}, I_{fw} – amplitudy prądów odpowiednio: podstawowej harmonicznej, oraz pierwszych składowych z pasm o niższych i wyższych częstotliwościach,

α_{fn}, α_{fw} – kąty przesunięć fazowych.

Przyjmując tak określone prądy jako współrzędne funkcji wektorowej, po przeliczeniu do prostokątnego układu współrzędnych $\alpha, \beta, 0$, uzyskuje się przebiegi hodografów jak na rys.1. W obliczeniach, czasy przebiegów hodografów dobrano tak, aby uwidocznili charakterystyczną cechę odkształcenia hodografu wypadkowego wektora prądów stojana silnika uszkodzonego, wynikającą z występowania składowych o częstotliwościach $(1 \pm 2s)f$. Odkształcenie przebiegu hodografu (od okręgu) występuje jako różnica amplitud wirującego wektora fazowych prądów stojana narastająca stopniowo od wartości minimalnej do maksymalnej i z powrotem malejąca do minimum, co pod względem graficznym przypomina kształt „księżycy w nowiu” przemieszczający się po obwodzie hodografu w kierunku wirowania wektora prądu. O ruchu tym można wnioskować z kilku kolejnych położeń takich różnic oznaczonych jako 1, 2, 3, 4 na rys.1.

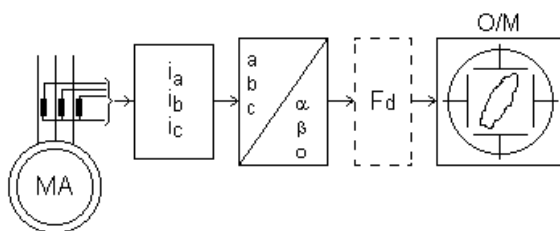


Rys.1. Teoretyczne przebiegi hodografów sinusoidalnych fazowych prądów stojana z uwzględnieniem składowych prądów o częstotliwościach $(1 \pm 2s)f$

4. Wyniki badań laboratoryjnych

Dla wykazania praktycznej przydatności hodografów wektorów fazowych prądów stojana jako sygnałów diagnostycznych, do wczesnego wykrywania pęknięć prętów (pierzścieni) wirników klatkowych przeprowadzono pomiary i rejestrację przebiegów hodografów dla silników z uszkodzonymi wirnikami.

Pomiary i rejestracja hodografów dokonywane były w warunkach laboratoryjnych. Schemat blokowy układu do pomiaru i obserwacji hodografów wektorów prądów stojana [5] w układach rzeczywistych jest pokazany na rys.2. Mierzone fazowe prądy stojana silnika stanowiące współrzędne funkcji wektorowej prądów w układzie naturalnym są przesyłane do układu przeliczającego $abc/\alpha\beta 0$ na współrzędne w układzie prostokątnym $\alpha,\beta,0$. Zasadniczo, w takiej postaci mogą być podane na wejścia pionowego i poziomego odchylenia oscyloskopu



Rys.2. Schemat blokowy układu do pomiaru i obserwacji hodografów prądów stojana maszyny asynchronicznej

(monitora). W przypadku, kiedy mierzone przebiegi prądów zasilających silnik asynchroniczny są przebiegami niesinusoidalnymi zawierającymi wyższe harmoniczne, wtedy dla uzyskania bardziej czytelnej postaci obserwowanych hodografów, sygnały prądowe mogą być poddane filtracji przy użyciu filtra dolnoprzepustowego Fd. W torze pomiarowym użyto filtra dolnoprzepustowego Fd o nastawianych wartościach umownej częstotliwości granicznej: $fg=2655\text{Hz}$, $fg1=576\text{Hz}$, $fg2=124\text{Hz}$. Przedmiotem badań były silniki asynchroniczne klatkowe *) typu Sf80-4A, $P=0.55\text{kW}$, $\cos\phi=0.77$, $I=2.52/1.47\text{A}$, $U=220/380\text{V}$, $n=1400\text{obr/min}$, klatka o 17 prętach.

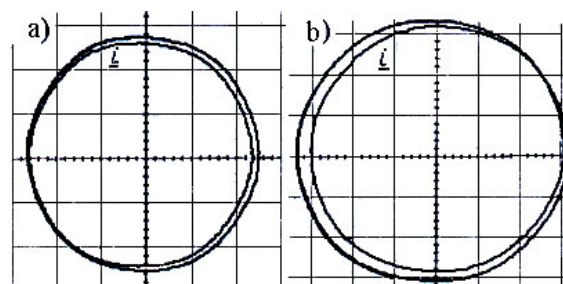
Podczas badań silniki zasilano napięciem z sieci energetycznej, w rzeczywistości odbiegającym od sinusoidalnego. Z tego względu w torze pomiarowym użyto filtra dolnoprzepustowego.

Oscylogramy przebiegów hodografów wektorów prądów fazowych stojana silnika asynchronicznego z pękniętym jednym prętem (5.88 % – całkowitej liczby prętów) klatki wirnika są pokazane na rys.3a, natomiast z dwoma pękniętymi prętami (11.76%) na rys.3b.

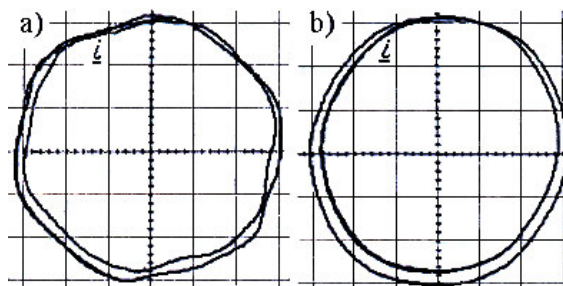
*) Badania laboratoryjne przeprowadzono dzięki wypożyczeniu silników przez Katedrę Maszyn Elektrycznych AGH

Podobne odkształcenie przebiegów hodografów wektorów prądów stojana silnika asynchronicznego występuje w przypadku pęknięcia pierścienia klatki wirnika – rys 4.

Na prezentowanych hodografach widoczne są zmiany amplitudy wektora prądów w czasie jego wirowania, co powoduje charakterystyczne przemieszczanie po obwodzie hodografu maksymalnej i minimalnej różnic jego zmieniającej



Rys.3. Oscylogramy hodografów prądów stojana silnika asynchronicznego: a) z jednym pękniętym prętem, b) z dwoma pękniętymi prętami klatki wirnika; $fg2 = 124\text{ Hz}$



Rys.4. Oscylogramy hodografów prądów stojana silnika asynchronicznego z pękniętym pierścieniem klatki wirnika; a) $fg1=576\text{Hz}$, b) $fg2=124\text{Hz}$

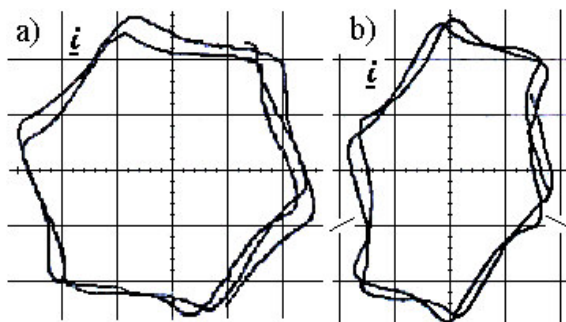
się amplitudy. O ruchu tym można wnioskować z porównania przedstawionych przebiegów hodografów na rys.3 i rys.4. Widoczne są na nich również inne wartości różnic amplitud w przypadku pęknięcia jednego i dwóch prętów klatki wirnika, odpowiednio $\sim 6\%$ i $\sim 10\%$ → rys.3a i rys.3b.

Podobne, charakterystyczne cechy hodografów wektorów fazowych prądów stojana maszyny asynchronicznej w przypadkach uszkodzeń klatek wirników występują i są widoczne również przy niesinusoidalnych przebiegach napięć zasilających silnik oraz w przypadkach równoczesnego wystąpienia innych zakłóceń, jak na przykład asymetrii impedancji w którejś z faz, a

nawet, chociaż są znacznie mniej czytelne, w przypadkach zmienności lub pulsacji momentu obciążenia maszyny.

Dla wspomnianych przypadków, pomiary i rejestrację przebiegów hodografów wektorów fazowych prądów stojana, w warunkach laboratoryjnych, przeprowadzono zasilając maszynę asynchroniczną poprzez falownik z prostokątną falą napięcia wyjściowego oraz w drugim przypadku zasilania poprzez falownik napięcia z modulacją szerokości impulsów. Przedmiotem badań były silniki asynchroniczne klatkowe typu Sg90S-6, o parametrach: $P=0.75\text{kW}$, $U=220/380\text{V}$, $I=3.7/2.2\text{A}$, $p=3$, $n=918\text{obr/min}$, $\cos\varphi=0.74$, $\eta=71\%$, $J=0.0036\text{kgm}^2$, klatka o 33 prętach.

Przebiegi oscylogramów hodografów wektorów prądów stojana silnika asynchronicznego z pękniętymi pięcioma sąsiednimi prętami (15%) klatki wirnika są przedstawione na rys.5. Silnik zasilano poprzez falownik z prostokątną falą napięcia wyjściowego, o kącie wysterowania tranzystorów falownika $\lambda_T = \pi$.



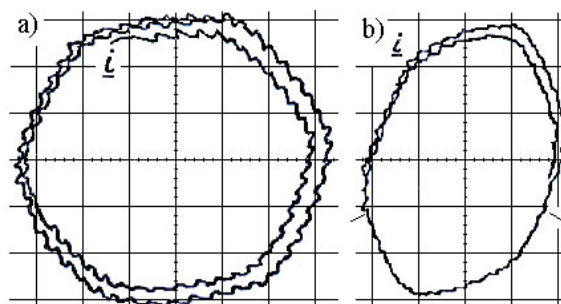
Rys.5. Oscylogramy hodografów prądów stojana silnika z pięcioma pękniętymi sąsiednimi prętami klatki wirnika; zasilanie poprzez falownik z prostokątną falą napięcia $\rightarrow \lambda_T = \pi$, $f \approx 20\text{Hz}$, $f_{g2} = 124\text{Hz}$; a) zasilanie symetryczne, b) niesymetria impedancji w fazie c

W przypadku zasilania symetrycznego widoczne jest charakterystyczne odkształcenie hodografów wektorów prądów stojana – rys.5a – polegające na przemieszczaniu się wzdłuż obwodu hodografu, dobrze widocznych na jego bokach, różnic amplitud wypadkowego wektora prądu spowodowanych występowaniem składowych prądów o częstotliwościach $(1 \pm 2sk)f$, pojawiających się w przypadku wystąpienia pęknięć prętów klatki wirnika.

Pod względem przydatności jako sygnały diagnostyczne interesujące są również przebiegi hodografów wektorów fazowych prądów sto-

jana silnika w przypadkach równoczesnego wystąpienia innych zakłóceń w pracy silnika, jak na przykład wystąpienie niesymetrii impedancji w jednej z faz lub napięć zasilających. Zakłócenie takie powoduje zwężenie hodografu w osi naturalnego układu współrzędnych a, b, c odpowiadającej fazie, w której wystąpiło zakłócenie. W takim przypadku dla silnika z uszkodzoną klatką, w przebiegu hodografu widoczne jest jego odkształcenie wynikające z występującej niesymetrii oraz równocześnie widoczne jest charakterystyczne przemieszczanie zmieniającej się różnicy amplitud wektora fazowych prądów stojana występującej w przypadku pęknięć prętów klatki wirnika – rys.5b.

W przemysłowych układach napędowych, obecnie najczęściej są stosowane rozwiązania z zasilaniem silników poprzez falowniki napięcia z modulacją szerokości impulsów (MSI).



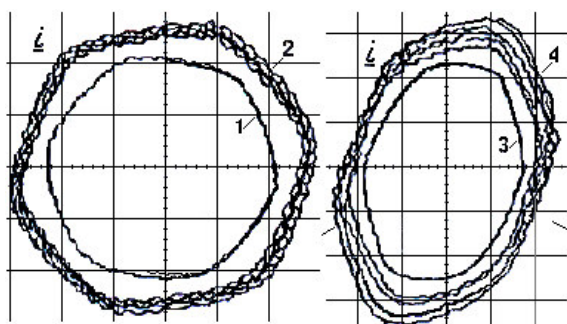
Rys.6. Oscylogramy hodografów prądów stojana silnika z pięcioma pękniętymi sąsiednimi prętami klatki wirnika; zasilanie poprzez falownik napięcia z MSI, $f \approx 30\text{Hz}$, $f_{g1} = 576\text{Hz}$; a) zasilanie symetryczne, b) niesymetria w fazie c

Przebiegi czasowe fazowych prądów stojana w przypadku zasilania silnika poprzez falownik napięcia z MSI są bardziej zbliżone do sinusoidalnych, stąd również przebiegi ich hodografów w większym stopniu są podobne do teoretycznych przebiegów hodografów pokazanych na rys.1, szczególnie w przypadku użycia w torze pomiaru prądów filtru dolnoprzepustowego o niższej umownej częstotliwości granicznej. Przebieg hodografu w przypadku pięciu pękniętych sąsiednich prętów klatki wirnika oraz symetrycznym zasilaniu pokazano na rys.6a. Natomiast przebieg hodografu dla przypadku równoczesnego wystąpienia pęknięć prętów klatki wirnika oraz niesymetrii impedancji w fazie c jest pokazany na rys.6b. Widoczne są deformacje hodografu spowodowane: niesymetrią impedancji – zwężenie hodografu w osi fazy c oraz pęknięciami pięciu prętów klatki wir-

nika – przemieszczająca się po obwodzie hodografu zmienna różnica amplitud wirującego wektora prądów stojana.

Interesujące i przydatne jako sygnały diagnostyczne, choć znacznie trudniejsze dla trafnej interpretacji i właściwej oceny, są również przebiegi hodografów w przypadku równoczesnego wystąpienia uszkodzeń prętów klatki wirnika, niesymetrii impedancji lub napięcia w którejś z faz oraz pulsacji momentu silnika.

Zestawione przebiegi hodografów dla silnika nie uszkodzonego oraz z pięcioma pękniętymi prętami klatki wirnika, przy zasilaniu poprzez falownik napięcia z MSI pokazano na rys.7.



Rys.7. Oscylogramy hodografów prądów stojana silników zasilanych przez falownik napięcia z MSI, $f \approx 30\text{Hz}$, $f_{g1} = 576\text{Hz}$; 1,2,3 - oscylogramy dla silnika nie uszkodzonego, 4 - oscylogram dla silnika z pięcioma pękniętymi prętami klatki wirnika

Przebieg hodografu dla normalnej pracy silnika nie uszkodzonego obciążonego stałym momentem jest oznaczony cyfrą 1, a przy obciążeniu pulsującym momentem – cyfrą 2. Dla tegoż silnika przy stałym momencie obciążenia i niesymetrii impedancji w fazie c odpowiada hodograf oznaczony cyfrą 3. Natomiast dla silnika z uszkodzoną klatką zarejestrowano oscylogram hodografu oznaczony cyfrą 4. W przebiegu hodografu widoczne są: zwężenie wynikające z niesymetrii impedancji w fazie c , pulsacja (zmiennosc) momentu obciążenia oraz mniej wyraźnie, ale zauważalne przemieszczanie się po hodografie, wcześniej omówionych, różnic maksymalnej i minimalnej wirującego wektora prądu (por. rys.6) będących wynikiem pęknięć prętów klatki wirnika.

Wypada zaznaczyć, że przy dłuższym czasie rejestracji przebiegów hodografów przebiegi są bardzo zagęszczone, co powoduje zatracenie zawartych w nich informacji przydatnych w diagnostyce uszkodzeń. Przy porównywaniu

hodografów, na przykład wzorcowego z rzeczywistym, dla zapewnienia poprawności wniosków, porównywane hodografy winny być określone w tak samo zorientowanych układach współrzędnych. Jest to istotne w ustaleniu rzeczywistych zwrotów wektorów oraz kierunków ich wirowania, co ma szczególne znaczenie w przypadkach wystąpienia niesymetrii i jej lokalizacji w diagnozowanym układzie. W przypadku ciągłego lub okresowego monitorowania omówione wyżej charakterystyczne cechy występujące w przypadku uszkodzeń klatki wirnika silnika asynchronicznego są widoczne i czytelne dla zaznajomionego z zagadnieniem obserwatora przebiegów hodografów.

5. Detekcja uszkodzeń

Niedogodnością w wykorzystaniu hodografów jako sygnałów diagnostycznych jest, że do ostatecznej oceny stopnia deformacji hodografu, a w rezultacie stwierdzenia wystąpienia pęknięć prętów klatki wirnika lub pierścienia zwierającego niezbędna jest interpretacja człowieka – obserwatora (diagnosty), wykorzystującego swoją wiedzę i doświadczenie w tym zakresie. Obiecujące są wyniki prac prowadzonych w ostatnich latach w niektórych ośrodkach badawczych krajów zachodnich. Prace te mają na celu automatyzację klasyfikacji hodografów diagnozowanego silnika i sygnalizację wykrytego uszkodzenia. Przeprowadzane są badania z zastosowaniem sieci neuronowych [3] lub układów z wykorzystaniem logiki rozmytej [7] do budowy tak zwanych klasyfikatorów lub detektorów uszkodzeń.

6. Zakończenie

Proponowaną metodę diagnostyki [5] zaliczyć należy do nieinwazyjnych. W rozwiązaniu opartym na obserwacji i ocenie hodografu fazowych prądów stojana silnika, w układach przemysłowych można wykorzystać najczęściej istniejący dla innych celów, układ pomiaru prądów maszyny. Cechy charakterystyczne hodografów w przypadkach pęknięć prętów klatki wirnika występują zarówno przy zasilaniu silnika napięciami sinusoidalnymi, jak i w przypadkach zasilania napięciami niesinusoidalnymi. Wynika to z przedstawionych oscylogramów hodografów dla przypadków zasilania silników poprzez falowniki napięcia. Cechy te występują również w przypadkach zakłóceń pracy silnika, na przykład spowodowanych niesymetrią impedancji w którejś z faz. Wypada

zaznaczyć, że ze wzrostem liczby pękniętych prętów [2,4] wartość sygnału i jego pulsacji może maleć, a nawet przyjmować wartości mniejsze niż przy małej liczbie pękniętych prętów. Celowe jest, zatem prowadzenie najkorzystniejszej ciągłej lub w pewnych odstępach czasu kontroli klatki wirnika (monitoringu), gdyż pozwala to na wykrycie uszkodzeń już w początkowym stadium, gdy sygnał diagnostyczny od składowych $i_{(1\pm 2ks) f}$ jest już wystarczająco wyraźny i jednoznaczny na przebiegu hodografu. Jest to korzystne z punktu widzenia niedopuszczenia do uszkodzeń dalszych prętów i wystąpienia poważniejszych awarii.

7. Literatura

- [1]. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., Vas P.: *AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.34, No.1, 1998, pp. 98-107.
- [2]. Гармаш В.С.: *Метод контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя*. Изв. вузов. Энергетика. 1990, № 10, с. 50-52.
- [3]. Nejari H., Benbouzid M.E.H.: *Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach*. IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.36, No 3, May/June 2000, pp. 730-735.
- [4]. Rams W., Rusek J.: *Wyniki pomiarów i obliczeń sygnału diagnostycznego $(1-2s)f_0$ silników indukcyjnych klatkowych*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, t.IV, z.1, 1998, s. 53-57.
- [5]. Strycharz J.: *Sposób i układ do wykrywania uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego*. Zgłoszenie w Urzędzie Patentowym RP, nr P 331653, 24.02.1999.
- [6]. Strycharz J.: *Hodografy funkcji wektorowej prądów stojana jako elementy diagnostyki klatek silników indukcyjnych*. Sprawozdania z Posiedzeń Komisji Naukowych. PAN, Oddział w Krakowie. T XLIII/2. Wyd. „Secesja”, Kraków, 2001, s. 64 -65.
- [7]. Zidani F., Benbouzid M.E.H., Diallo D., Nait-Said M.S.: *Induction motor stator faults diagnosis by a current Concordia pattern-based fuzzy decision system*. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol.18, No 4, Dec. 2003, pp. 469-475.