

Piotr Paduch, Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

APARATUROWE I METROLOGICZNE ASPEKTY DIAGNOSTYKI MASZYN ELEKTRYCZNYCH W OPARCIU O SYGNAŁ PRĄDOWY

EQUIPMENT AND METROLOGICAL ASPECTS OF ELECTRIC MACHINE DIAGNOSTICS BASED ON A CURRENT SIGNAL

Abstract: Current-based diagnostics of electric motors is most common in the industry. Almost all basic defects of the motor are “reflected” in the current of the stator in the induction motor. Using measurements and analysis of a current signal, we can detect the following, among others, in the motor: cage damages; gap asymmetry; the lack of centricity in the setting of the motor in respect of the driving machine; unbalance of the rotor; bearing damages; partial discharges in the insulation. In the article, the authors presented the issue of measurement and analysis of a current signal; they also analysed the use of individual measuring detectors. The article shows possibilities of using Rogowski coils for utilisations diagnostics of squirrel-cage induction motors. It presents possibilities of application for: detection of non-alignment in the drive; cage damages; and air-gap asymmetry.

1. Wstęp

Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych maszyn należy wyróżnić bardzo efektywne badania, opierające się na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn. Diagnostyka prądowa silników elektrycznych należy do najczęściej stosowanych w przemyśle. W prądzie stojana silnika indukcyjnego znajdują swoje „odbicie” prawie wszystkie podstawowe uszkodzenia silnika. Stosując pomiar i analizę sygnału prądowego można wykryć w silniku między innymi [19];

- uszkodzenia klatki,
- niesymetrię szczeliny,
- niecentryczność ustawienia silnika względem maszyny napędzanej,
- niewyważę wirnika,
- uszkodzenia łożysk,
- wyładowania niepełne w izolacji.

Jest to właściwie prawie wszystko z wykazu najczęstszych uszkodzeń silnika. Autorzy bardzo często stosują diagnostykę prądową silników indukcyjnych. Dokładny pomiar prądu elektrycznego jest bardzo ważny nie tylko ze względów technicznych, ale również ze względów ekonomicznych. Dokładny pomiar prądu jest niezbędny w określeniu wielkości energii elektrycznej pomiędzy jej wytwórcami i konsumentami. Dla celów eksploatacyjnych i diagnostycznych maszyn elektrycznych, niezbędna jest informacja o „prądzie” w dziedzinie czasu i częstotliwości. W praktyce pomiarowej zachodzi

konieczność pomiarów prądu w bardzo szerokim zakresie, często wręcz od ładunku elektrycznego (pC) do wartości rzędu setek kA. Również spektrum częstotliwościowe jest ogromne. Od prądu stałego do GHz. Czujniki prądu są pierwszym członem toru pomiarowego i analizującego sygnał prądowy. Są to elementy, w których wykorzystuje się najczęściej dwa zjawiska [1÷3, 10÷18, 20, 21]:

- spadek napięcia na przewodniku, przez który płynie prąd,
- pole magnetyczne wokół przewodnika, w którym płynie prąd.

O wyborze rodzaju czujnika prądu, decydują w pierwszej kolejności możliwości ekonomiczne a następnie uwarunkowania techniczne pomiaru. W zastosowaniach praktycznych można spotkać następujące czujniki prądu [1÷3, 10÷18, 20, 21]:

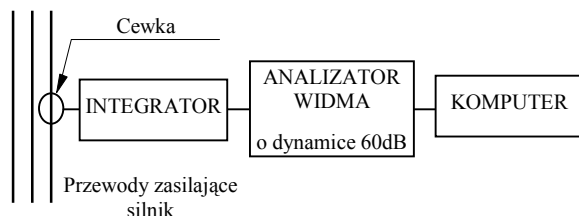
- rezystancyjne (boczniki),
- transformatorowe - przekładniki,
- hallotronowe,
- z elementami magnetorezystancyjnymi,
- cewki Chattocka - Rogowskiego,
- optoelektroniczne i światłowodowe.

Do najistotniejszych wad prądowych czujników rezystancyjnych należy zaliczyć brak galwanicznego oddzielenia wejścia od wyjścia, występowanie szumów będących wynikiem wydzielania się energii cieplnej oraz występowanie pasożytniczych indukcyjności i pojemności. W stosowanych powszechnie czujnikach trans-

formatorowych występują najczęściej ograniczenia częstotliwościowe. Stosowaniu w nich rdzeni magnetycznych towarzyszą zjawiska histerezy i nasycenia. Hallotronowe czujniki prądu, zwłaszcza pracujące w układzie zamkniętym, zapewniają galwaniczne oddzielenie wejścia od wyjścia, zakres częstotliwości do setek kHz, bardzo dobrą liniowość, małą wrażliwość na zmiany temperatury, brak histerezy, zakres mierzonych prądów od mA do kA. Rozwiązania praktyczne takich czujników sprowadzają się do konstrukcji typu miernik cęgowy. Układy elektroniczne i baterie zasilające znajdują się w rękojeści miernika. Magnetorezystancyjne czujniki prądu w stosunku do hallotronów mają większą czułość, mniejsze wymiary i można je stosować do pomiarów prądu w szerszym zakresie częstotliwości [3, 6]. Odkryte pod koniec lat osiemdziesiątych zjawisko „gigantycznego magnetooporu” GMR (Giant Magnetoresistive Effect) może znaleźć w przyszłości zastosowanie do pomiarów prądu. Obecnie wykorzystuje się już GMR między innymi do odczytu informacji z twardych dysków, płyt CD i DVD [3, 6].

2. Przykłady diagnostyki w oparciu o sygnał prądowy

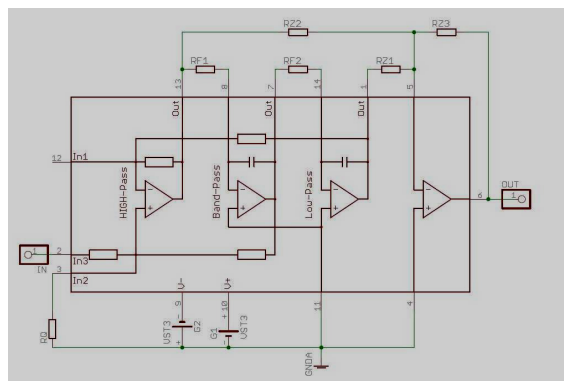
Wobec ograniczeń metrologicznych przekładników prądowych stosowanych w obwodach wtórnych silników [6], gdy nie są dostępne charakterystyki częstotliwościowe danego przekładnika (a tak jest najczęściej), do pomiarów diagnostycznych autor [19] używa elastycznych cewek Rogowskiego zakładanych na przewody zasilające dany silnik - rys.1. i rys.5÷7. Gdy nie ma możliwości założenia cewek Rogowskiego ze względów bezpieczeństwa, autor [19] ogranicza się do diagnostyki prądowej niskoczęstotliwościowej - niecentryczność i klatka. Prąd stojana silnika mierzy się w rozdzielniach bez-



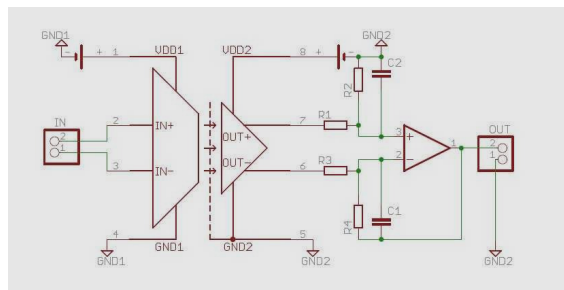
Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego A do pomiarów i analizy sygnału prądowego

pośrednio na przewodach zasilających silnik używając do pomiaru cewki Rogowskiego o pa-

śmie przenoszenia 20 kHz i o izolacji 10 kV. Analizę widmową wykonuje się przemysłowym analizatorem widma o dynamice 60 dB, posiadającym procedury pomiarowe FFT i FFT ZOOM. Dla zapewnienia korzystniejszych warunków dla pomiarów diagnostycznych zaprojektowano i zbudowano układ filtra środkowo-zaporowego wąskopasmowego tłumiącego częstotliwość 50 Hz w zakresie 25 dB wraz ze sprzęgłem optycznym w celu zapewnienia bezpieczeństwa przy pomiarach i analizach prądowych silników WN prowadzonych głównie w rozdzielniach po stronie pierwotnej. W warunkach ekstremalnych układ ten może być zasilany z ogniwa fotowoltaicznego. Schemat ideowy filtra przedstawiono na rys.2. Schemat sprzęgła optycznego pokazano na rys.3. Zdjęcie układu filtra wraz ze sprzęgłem optycznym przedstawiono na rys. 4.



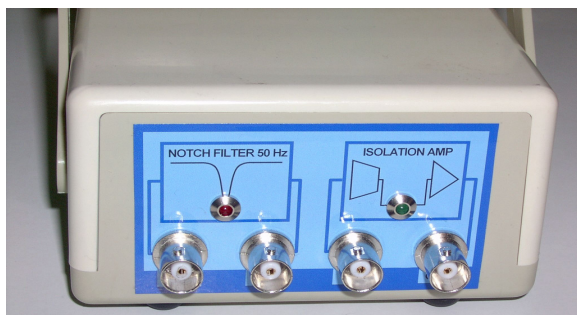
Rys. 2. Schemat ideowy filtra środkowo-zaporowego na częstotliwość 50 Hz



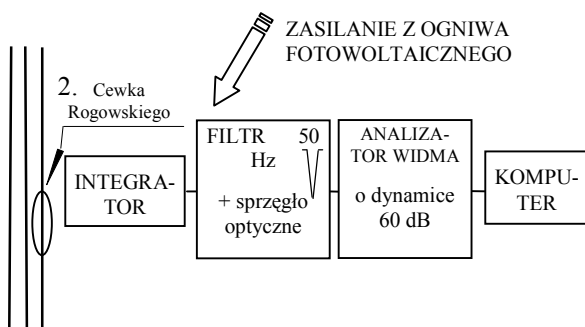
Rys. 3. Schemat ideowy sprzęgła optycznego, wzmacniacz z separacją optyczną

Jako filtru użyto monolitycznego układu scalonego UAF42 firmy Burr Brown [4, 5] zawierającego klasyczny układ analogowy składający się ze wzmacniacza sumującego i dwóch integratorów. O jego wyborze zdecydowała bardzo mała ilość elementów potrzebnych do aplikacji i bardzo dobre parametry elektryczne (tłumienie 60 dB dla 50 Hz). Producent filtra umożliwia również skorzystanie z darmowego

programu do projektowania filtrów na bazie UA42. W trakcie pomiarów niezbędnym stało się dokładne ekranowanie filtru w celu uzyskania maksymalnego efektu „wycięcia” składowej 50 Hz. Bardzo istotnym elementem był również dokładny dobór wartości rezystorów. Zastosowano w tym przypadku sprawdzony sposób szlifowania warstwy oporowej i jednoczesnego pomiaru mostkiem aż do uzyskania żądanej wartości rezystancji. Tolerancja tak wykonanych elementów nie przekroczyła wartości 0,01%. Jako wzmacniacz separujący wykorzystano układ firmy Hewlett Packard HCPL7800 z izolacją optyczną (High CMR Isolation Amplifier) zapewniający dużą liniowość z dokładnością 0,1 %. Zbudowane urządzenie pośredniczące umożliwi również autonomiczną pracę elementów składowych czyli filtru i wzmacniacza separującego oddzielnie. Schemat blokowy układu pomiarowego do diagnostyki prądowej z wykorzystaniem elementów zaprojektowanych i wykonanych przedstawiono na rys. 5. Układ ten ma walory uniwersalnego bezpiecznego układu diagnostycznego wykorzystującego sygnał prądowy. W wariancie z analizatorem 60 dB ma dynamikę 85 dB natomiast z analizatorem 80 dB pozwala analizować syg-



Rys. 4. Zdjęcie układu filtra wraz ze sprzęgłem optycznym



Rys.5. Schemat blokowy układu pomiarowego B do pomiarów i analizy sygnału prądowego



Rys. 6. Pomiar prądu silnika w rozdzielni elastycznymi cewkami Rogowskiego



Rys. 7. Elastyczne cewki Rogowskiego, pomiar prądu silnika

nał w dynamice 105 dB. Zdaniem autorów powinno to zapewnić bardzo dobre warunki do wszelkich pomiarów diagnostycznych prądowych w tym łożyskowych. Poniżej przedstawiono kilka przykładów diagnostyki silników w oparciu o sygnał prądowy.

2.1. Wykrywanie niecentryczności

W prądzie stojana silnika, który jest niecentrycznie zesprzęglony z urządzeniem napędzanym występuje modulacja amplitudowa składowej f_1 - 50 Hz (częstotliwość zasilania) składowymi od prędkości obrotowej f_{obr} :

$$f_n = f_1 \pm m f_{obr} \quad (1)$$

gdzie; f_n - nowe częstotliwości powstające w wyniku modulacji,

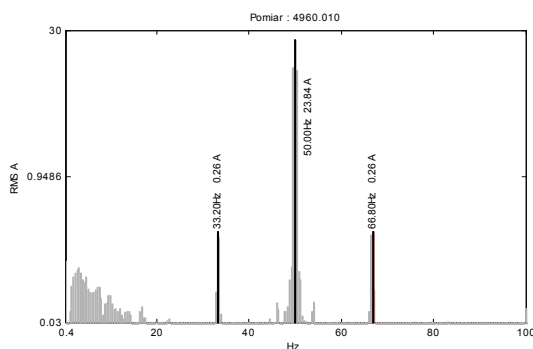
f_1 - częstotliwość zasilania,

$m = 1,2,3$, kolejne harmoniczne,

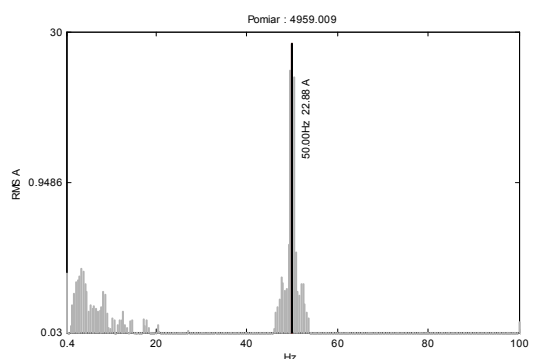
f_{obr} - częstotliwości od prędkości obrotowej.

Od końca lat 80- tych autor[19] wykorzystuje sygnał prądowy do diagnostyki stanu „wyosiovania napędu”. Poniżej przedstawiono ciekawy przypadek przemysłowy. W jednej z elektrowni diagnozując silniki przy użyciu cewek Rogow-

skiego w tym badając silnik SZJc 196t-6kV, 320kW, 993obr/min, 41.8A napędzający przekładnię, stwierdzono że widmo prądu silnika odbiega od oczekiwanego, - rys.8. W widmie zwraca uwagę występowanie obok składowej 50Hz, modulujących składowych obrotowych. Napęd zatrzymano i zmierzono tzw. „centrówkę”. Okazało się że występuje niecentryczność, w pionie 50/100mm, kątowne niewielkie, w poziomie 35/100mm, kątowne niewielkie. Napęd wyosiowano, mieszcząc się w 7/100mm w pionie i poziomie, przy kątowym 0. Następnie ponownie zmierzono widmo prądu stojana silnika. Przedstawia je rys.9, zwraca uwagę fakt nie występowania obok składowej 50Hz, modulujących składowych obrotowych.



Rys. 8. Widmo prądu silnika



Rys. 9. Widmo prądu silnika po korekcie „centrówki”

2.2. Diagnostyka klatek

Znakomita większość diagnostów oraz systemy diagnostyczne diagnozują klatkę silników analizując widmo prądu głównie wokół 50Hz (częstotliwość zasilania). Autorzy artykułu wsparci pracami swoich Kolegów [20] diagnozują w oparciu o częstotliwości diagnostyczne f_k informujące o uszkodzeniu klatki określone ogólnie wzorem [20]:

$$f_k = f_l [(6k \pm 1) - (6k \pm 2l) s] \quad (2)$$

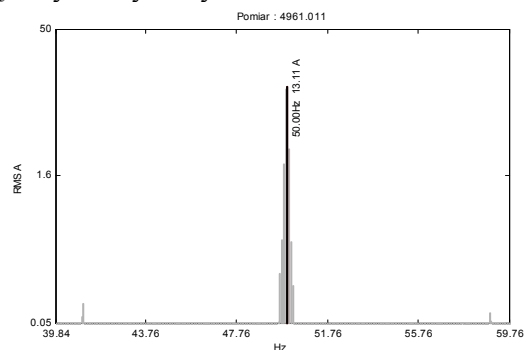
gdzie: f_l - częstotliwość zasilania, $k, l = 0, 1, 2, \dots$ dla pierwszych wyrazów tego szeregu otrzymamy częstotliwości diagnostyczne:

-dla otoczenia 1-wszej harmonicznej zasilania:
 $f_l (1 \pm 2s), f_l (1 \pm 4s), f_l (1 \pm 6s) \quad (3)$

-dla otoczenia 5-tej harmonicznej zasilania:
 $f_l (5-2s), f_l (5-4s), f_l (5-6s), f_l (5-8s) \quad (4)$

-dla otoczenia 7-mej harmonicznej zasilania:
 $f_l (7-4s), f_l (7-6s), f_l (7-8s), f_l (7-10s) \quad (5)$

Zwraca uwagę fakt, że dla otoczenia 5-tej i 7-mej harmonicznej w zależnościach występuje jedynie znak minus. Analiza widma prądu w obszarze tych harmonicznych jest wskazana w szczególności, gdy silnik jest słabo obciążony (poniżej $0.5s_n$), wówczas częstotliwości poślizgowe wokół f_l . [20] mogą nie być wyraźnie wyróżnione i diagnoza może być niepewna. Wówczas o wyniku diagnozy przesądza analiza widma prądu w otoczeniu 5-tej i 7-mej harmonicznej (4), (5). Dla przykładu na rys. 10÷13 przedstawiono wyniki analizy widmowej prądu stojana wykonanych przy użyciu cewek Rogowskiego dla dwóch silników tego samego typu. Silniki 225kW, 27A, 1484 obr/min., napędzały wentylatory.

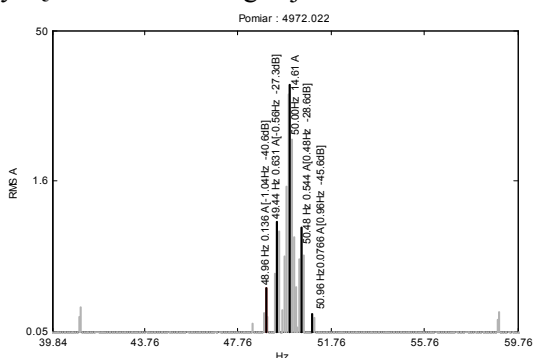


Rys. 10. Widmo prądu stojana silnika 1, FFT ZOOM dla 50Hz

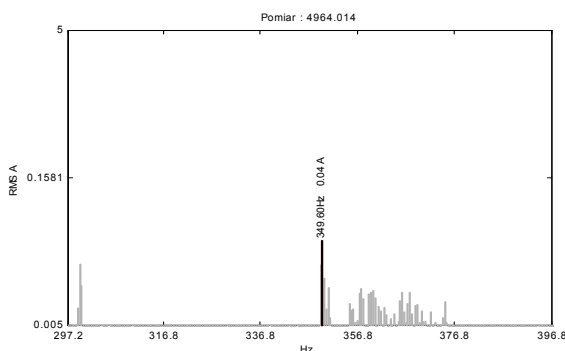
Silnik nr 1, rys. 10 i rys. 12 ma klatkę dobrą, natomiast silnik nr 2, rys.11 i rys.13 ma klatkę uszkodzoną. Kryterium diagnostycznym jest wielkość różnicy poziomów dla składowej f_l i prążków poślizgowych. Według autorów artykułu silnik należy wyłączyć z eksploatacji, jeżeli różnica ta zmaleje do poziomu 35dB. Klatkę należy poddać remontowi. Tak też uczyniono z silnikiem nr 2, silnik zatrzymano, rozebrano, stwierdzono pęknięcie kilku prętów klatki w pobliżu pierścieni zwierających. Klatkę silnika naprawiono, a silnik po remoncie uruchomiono.

2.3. Niesymetria szczeliny

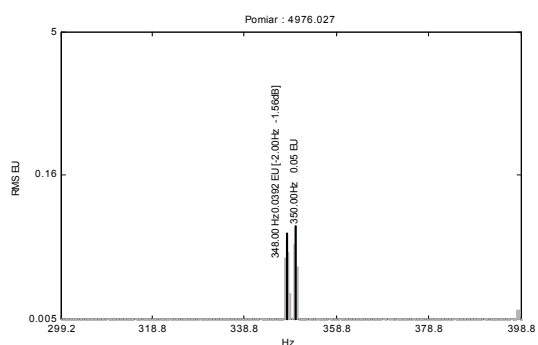
Przyczyny powstawania ekscentryczności szczeliny powietrznej oraz związane z tym efekty są omówione w bogatej literaturze.



Rys. 11. Widmo prądu stojana silnika 2, FFT ZOOM dla 50Hz



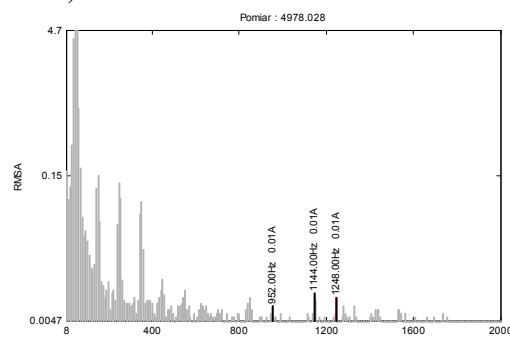
Rys. 12. Widmo prądu stojana silnika nr1, FFT ZOOM dla 350Hz



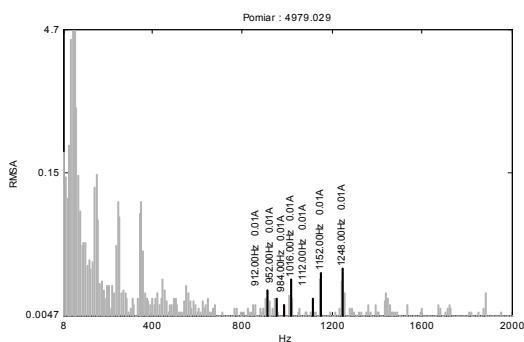
Rys. 13. Widmo prądu stojana silnika nr2, FFT ZOOM dla 350Hz

W wyniku niesymetrii szczeliny powietrznej w silniku dochodzi do deformacji pola w szczelinie, czego efekty mogą być obserwowane w widmie prądu stojana. Szczególnie przydatne jest otoczenie tzw. częstotliwości żłobkowych. W literaturze cytowanej wyżej podane są szczegółowe wzory na częstotliwości diagnostyczne dla niesymetrii statycznej, dynamicznej i mieszanej. Autorzy artykułu dla

przybliżenia zagadnienia prezentuje na rys.12 i 13 wyniki badań dla silnika 320kW, 6kV, 41.8A, 993obr/min., $Z_2=58$ (liczba żłobków wirnika).



Rys. 14. Widmo prądu stojana silnika z akceptowalną niesymetrią szczeliny



Rys. 15. Widmo prądu stojana silnika z nieakceptowalną niesymetrią szczeliny

Na rys.12 i 13 przedstawiono widma prądu stojana w obszarze obejmującym częstotliwości żłobkowe. Pomiary wykonywano przy użyciu cewek Rogowskiego. Rys.12 przedstawia widmo prądu silnika z akceptowalną niesymetrią szczeliny. Rys.13 to wynik pomiarów po rocznej intensywnej eksploatacji napędu, widać wyraźnie wzrost poziomu składowych diagnostycznych w stosunku do 50Hz. Stwierdzono że silnik ma nieakceptowalną niesymetrię szczeliny. Silnik ten zakwalifikowano do remontu, diagnoza okazała się być trafna, stwierdzono duże luzy w tarczach łożyskowych.

3. Uwagi końcowe

Diagnostyka prądowa silników elektrycznych należy do najczęściej stosowanych w przemyśle. W prądzie stojana silnika indukcyjnego znajdują swoje „odbicie” prawie wszystkie podstawowe uszkodzenia silnika. Stosując pomiar i analizę sygnału prądowego można wykryć w silniku między innymi: uszkodzenia klatki, niesymetrię szczeliny, niecentryczność ustawienia silnika względem maszyny napę-

dzanej, niewywęgę wirnika, uszkodzenia łożysk, wyładowania niezupełne w izolacji. W artykule autorzy przedstawili zagadnienie pomiaru i analizy sygnału prądowego, zanalizowano zastosowania poszczególnych czujników pomiarowych. Pokazano możliwości wykorzystania cewek Rogowskiego do diagnostyki eksploatacyjnej silników indukcyjnych klatkowych. Przedstawiono możliwości zastosowań do: wykrywania nieosiowości w napędzie, uszkodzenia klatki, oraz niesymetrii szczeliny powietrznej.

4. Literatura

- [1]. ADWEL.: *Nota Aplikacyjna. Aparatura* 2004.
- [2]. Bobrowski P., Kopeć A.: *EL CID – 14 lat doświadczeń pomiarowych firmy Westinghouse Modelpol*. XIV Konferencja Energetyki, Książ 7 - 9 września 2005, Materiały Konferencyjne.
- [3]. Bolkowski J.: *Czujniki prądu*. Materiały Konferencyjne EPN, 2002.
- [4]. Burr-Brown Application Bulletin *Design a 60Hz Notch Filter with the UA42*, 1994 r.
- [5]. Datasheet Texas Instruments *Universal Active Filter*, 2000 r.
- [6]. Dzierżanowski A., Szczot F., Szymaniec S.: *Pomiary prądu w diagnostyce układów elektroenergetyki, elektromechaniki i energoelektroniki*. Wiadomości Elektrotechniczne, 2003, nr 4, str. 171-175.
- [7]. Kojovic L.: *High-precision Rogowski coil for improved relay protection, control and measurements*, Bulletin Number 02049, Cooper Industries, Inc. 2002.
- [8]. Kojovic L.: *PCB Rogowski coils benefit relay protection*, IEEE Computer Applications in Power, lipiec 2002.
- [9]. Kopeć A.: *Nowoczesne technologie diagnostyczne dla urządzeń energetycznych stosowane przy minimum demontażu*. XIII Konferencja Energetyki, Kliczków 10-12 września 2003r Materiały Konferencyjne.
- [10]. Lisowiec A., Dumala J.: *Zabezpieczenie ziemnozwarciowe z cewkami Rogowskiego pracującymi w układzie sumacyjnym*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, nr 7-8, 2008, str. 34-36.
- [11]. Miedziński B., Szkółka S., Wiśniewski G.: *Cewki Rogowskiego jako elementy nowoczesnych układów automatyki i pomiarów*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, nr 2, 2007, str.23-30.
- [12]. Miedziński B., Szkółka S., Borczyński J., Kowalski Z.: *Właściwości przetworników prądowych z cewką Rogowskiego w układach pomiarowych zabezpieczeń*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, nr 7, 2007, str.77-84.
- [13]. Optical CTs and VTs, www.nxtphase.com, 2003.
- [14]. Opto-electronic Sensors. *A New Generation of Instrument Transformers - HV Instrument transformers*, www.tde.alstom.com, 2003.
- [15]. Paley D.B.: *Current Low Power Core Testing Using EL CID Ref*. IEE Colloquium – Understanding your condition monitoring April 1999.
- [16]. Pierzgalski W.: *Zastosowanie czujników prądowych Rogowskiego w obwodach pomiarowych analizatorów parametrów sieci elektroenergetycznej*. Materiały Konferencyjne EPN, 2002.
- [17]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.
- [18]. Wach P.: *Niesymetrie wewnętrzne maszyn indukcyjnych*. Monografia, Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Elektryka z. 19, Opole 1982.
- [19]. Ward D.A., Exon J. La T.: *Using Rogowski coils for transient current measurements*. EsaEJ, June 1993.

Autorzy

mgr. inż. Piotr Paduch
 Politechnika Opolska.
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki
 i Informatyki.
 Instytut Układów Elektromechanicznych
 i Elektroniki Przemysłowej.
 45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
 p.paduch@po.opole.pl

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO
 Politechnika Opolska.
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki
 i Informatyki.
 Instytut Układów Elektromechanicznych
 i Elektroniki Przemysłowej.
 45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
 s.szymaniec@po.opole.pl