

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

DIAGNOSTYKA MASZYN ELEKTRYCZNYCH W ELEKTROWNIACH – PRZYKŁADY PRAKTYCZNE

DIAGNOSTIC OF ELECTRICAL MACHINES IN POWER PLANTS – PRACTICAL EXAMPLES

Abstract: This paper presents the diagnostic methods used in power stations to evaluate the technical conditions of electric machines which have been used for years in the Opole Power Station. The thermovision techniques used to diagnose rotor cages in induction motors are described in detail. A method to evaluate insulation windings conditions through the introduction of diagnostic factor for them is presented. Examples of such an evaluation and its practical application are included.

1. Wstęp

W ostatnich latach zmniejszyła się znacznie ilość uszkodzeń silników elektrycznych WN eksploatowanych w elektrowniach. Jak podaje [1] współczynnik awaryjności określający stosunek ilości silników uszkodzonych w ciągu roku do ilości silników zainstalowanych zmniejszył się co najmniej kilkanaście razy. Wiąże się to ewidentnie z coraz większym stosowaniem profilaktycznych badań diagnostycznych, doskonaleniem aparatury diagnostycznej, a także większą kulturą eksploatacji napędów. Spotykane uszkodzenia silników indukcyjnych WN stosowanych w elektrowniach węglowych sprowadzają się głównie do uszkodzeń obwodów elektrycznych, czyli klatek i uzwojeń stojanów oraz łożysk. Przyczynami uszkodzeń mogą być zjawiska zewnętrzne takie jak np. przepięcia sieciowe i łączeniowe, odkształcenia napięcia zasilania od kształtu sinusoidalnego, zagrożenia środowiskowe takie jak zawilgoceenie, zapylenie itd. Przyczynami uszkodzeń mogą być też zjawiska związane z normalną eksploatacją silników a więc rozruchy, a przede wszystkim rozruchy długie lub często powtarzające się po sobie. Przyczyną uszkodzeń mogą być też przeciążenia silników.

2. Metody elektryczne wykrywania uszkodzeń klatek

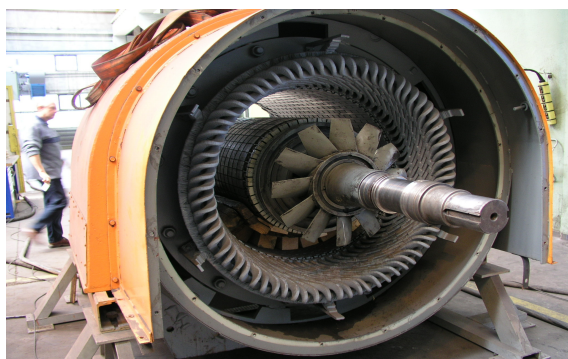
W wyniku uszkodzenia klatki silnika indukcyjnego powstaje niesymetria obwodu elektrycznego wirnika. Jest ona przyczyną powstania składowej przeciwnej kolejności pola magnetycznego, a jej skutkiem jest pojawienie się w prądzie zasilania składowych o tzw. częstotliwościach poślizgowych $(1-2s)f$ oraz $(1+2s)f$,

gdzie f oznacza częstotliwość napięcia zasilania, a s poślizg wirnika. Pomiar tych diagnostycznych składowych w prądzie zasilania jest możliwy w trakcie normalnej eksploatacji silników, ale wymaga to obciążenia silnika co najmniej połową znamionowego momentu obciążenia. Podczas rozruchu występuje również, o zmniejszającej się amplitudzie, składowa o częstotliwości $(1-2s)f$, która przy połowie prędkości synchronicznej spada do zera. Obie te metody dobrze się uzupełniają, a ich porównanie przeprowadzono w [2]. Metody te pozwalają na prowadzenie okresowych badań diagnostycznych klatek, archiwizację danych, obserwację trendów i w ten sposób, przez analizę wyników w czasie, pewną ocenę aktualnego stanu klatek. W przypadku silników dwuklatkowych obie te metody nie są równoważne, pomiary diagnostyczne prądu rozruchowego dają informację przede wszystkim o stanie klatki górnej (rozruchowej), a pomiary prądu zasilania obciążonego silnika o stanie klatki dolnej (pracy). Pomimo tego, że metody te są wystarczające aby ocenić stan klatki, może zachodzić potrzeba lokalizacji uszkodzenia klatki. Do tego celu dobrze nadaje się metoda termograficzna. Metoda ta pozwala dodatkowo na ocenę stanu obwodu magnetycznego (np. żelaza wirnika).

3. Wyniki badań stanu wirnika metodą termograficzną

Metoda termograficzna zastosowana do analizy stanu obwodów elektrycznych wirnika zrealizowana została w oparciu o rejestrację rozkładu temperatur (termogramów) kamerą termowizyjną (skanerem) produkcji Agema Szwecja o

rozdzielczości $0,1^{\circ}\text{C}$. Istotnym elementem metody jest wymuszenie prądu w obwodach elektrycznych klatki wirnika tak, żeby możliwa była obserwacja wizualna wszystkich połączeń prętów klatki i blach żelaza czynnego. W tym celu badany wirnik silnika indukcyjnego typu SYJe 142/01 o mocy 3,15 MW został włożony do stojana silnika indukcyjnego typu SYJe-154t/02/E o mocy 6,3 MW. Wirnik został ustawiony symetrycznie w stosunku do osi stojana, sposób włożenia wirnika przedstawiono na fot. 1.



Fot.1 Nagrzewanie badanego wirnika silnika indukcyjnego typu SYJe 142/01 o mocy 3,15MW w stojanie silnika indukcyjnego typu SYJe-154t/02/E o mocy 6,3 MW

Kolejnym elementem badania było wymuszenie przepływu prądu w obwodach klatki wirnika. W tym celu stojan silnika opisanego wyżej został zasilony 3-fazowo ze źródła o mocy 1,2 MW o regulowanym napięciu i częstotliwości. Wytworzony strumień magnetyczny wymusił prąd w obwodach klatki wirnika. Regulację wielkości napięcia zasilania dobrano tak, żeby przyrost temperatury był około $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Mimo posadowienia wirnika jak na fot.1 w czasie nagrzewania nie stwierdzono drgań wirnika.

Sprawdzenie obwodów elektrycznych klatki wirnika polegało na sprawdzeniu połączeń prętów klatki z pierścieniem zwierającym, oraz sprawdzeniu czy nie ma lokalnych znacznych przyrostów temperatury na powierzchni żelaza czynnego wirnika. Wcześniej badany wirnik został poddany oględzinom zewnętrznym, w trakcie których stwierdzono pęknięcia mocowania prętów klatki, przesunięcie kątowe osi prętów między pierścieniem a żelazem czynnym w stosunku do osi żłobka. Defekty te przedstawia fot. 2, 3 i 4.

Przebieg nagrzewania wirnika był monitorowany kamerą termowizyjną, na wszystkich nagrzewających się powierzchniach połączeń

prętów klatki z pierścieniem zostały wykonane termogramy.



Fot.2 Pęknięte mocowanie pręta klatki z pierścieniem



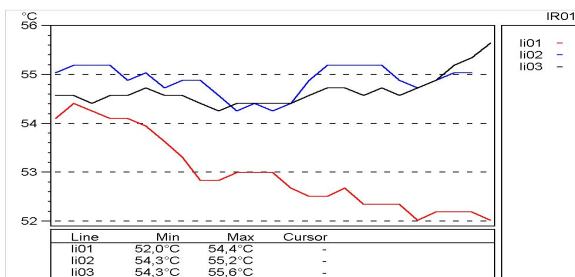
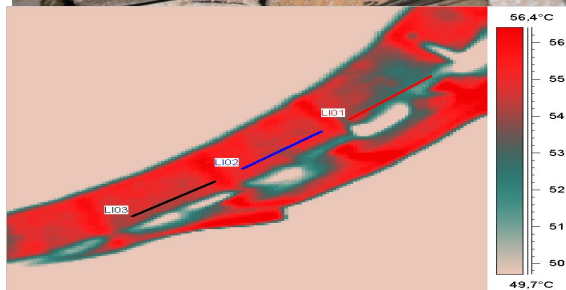
Fot.3 Krzywe pręty klatki



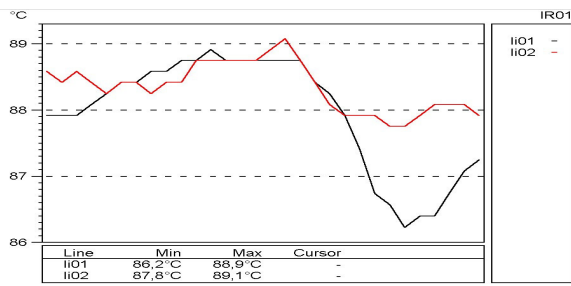
Fot.4 Uszkodzone żelazo czynne

Wszystkie zarejestrowane termogramy zostały poddane wnikliwej analizie komputerowej, analiza ta polegała m.in. na dobraniu odpowiedniej skali barw, którym były przyporządkowane określone wielkości temperatur oraz wykonaniu histogramów rozkładu temperatur na analizowanych powierzchniach. W analizie tej istotą zagadnienia było wykrywanie znaczących względnych różnic temperatur. Wielkość maksymalnej temperatury ulegała zmianie wraz z upływem czasu nagrzewania się wirnika, nie miało to jednak większego znaczenia, ograniczeniem była tylko maksymalna wartość temperatury, do której mógł się nagrzać wirnik, założono, że temperatura ta nie może przekroczyć

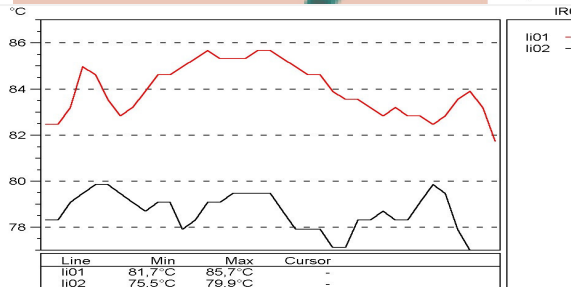
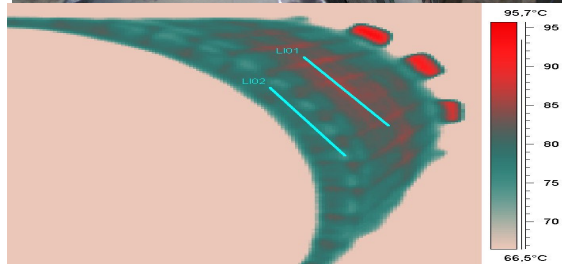
wartości 120°C. W wyniku analizy wykryto w ten sposób dwa razy więcej defektów niż przy oględzinach zewnętrznych. Przykłady analizy termogramów połączeń prętów przedstawiają fot. 5 i 6, natomiast fot. 7 obrazuje lokalne przyrosty temperatur na powierzchni żelaza czynnego.



Fot.5. Przykład analizy połączenia prętów klatki z pierścieniem



Fot.6. Przykład analizy połączenia prętów klatki z pierścieniem



Fot. 7. Przykład analizy nagrzania powierzchni żelaza wirnika

4. Metody oceny stanu izolacji uzwojeń stojanów

Pomiary diagnostyczne stanu izolacji uzwojeń stojanów są jednymi z podstawowych badań diagnostycznych. Wynikiem takich pomiarów powinno być zawsze jednoznaczne stwierdzenie, czy maszyna nadaje się do dalszej bezpiecznej eksploatacji, czy też są zastrzeżenia odnośnie jej stanu. Uszkodzenia uzwojeń stojanów rozwijają się szybko, a skutkiem ich może być groźna awaria. Najczęściej stosowanymi nieniszczącymi badaniami są: pomiar tgδ, pomiar wyładowań niepełnych i pomiary napięciem stałym. Pierwsza metoda daje niezbyt pewne rozeznanie o stanie izolacji maszyn.

Większą pewność oceny umożliwiają dwie pozostałe wielokryterialne metody. W opracowaniu zajęto się metodą badań izolacji uzwojeń stojanów wielokryterialną metodą prądu stałego (WMPS) i kryteriami stosowanymi do oceny jej wyników.

Metoda ta i jej zastosowanie do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych jest znana od wielu lat [3], została spopularyzowana, rozszerzona i wprowadzona w Polsce [4], jest nawet objęta polską normą [5]. Metoda ta polega na pomiarach:

- charakterystyki rezystancji izolacji w funkcji napięcia $R_{60} = f(U)$ i wyznaczeniu na jej podstawie hipotetycznego napięcia przebicia U_p

- przebiegu czasowego prądu upływu $I_p = f(t)$, po skokowym załączeniu, na całkowicie rozładowany układ izolacyjny, napięcia stałego o wartości równej znamionowemu napięciu U_n badanej maszyny i wyznaczeniu na tej podstawie ustalonej wartości prądu upływu I_{pu}

- przebiegu czasowego odbudowy napięcia polegającego na naładowaniu układu izolacyjnego maszyny stałym napięciem o wartości znamionowej, aż do uzyskania stanu ustalonego, następnie odłączeniu napięcia zasilającego i zwarcia układu izolacyjnego na określony czas t_z , po czym rozwarciu układu izolacyjnego, pomiarze przebiegu czasowego odbudowy napięcia $U_{od} = f(t)$ na układzie izolacyjnym i wyznaczeniu największej wartości napięcia jako napięcia odbudowy $U_{od\ max}$ oraz czasu, po którym zostało ono osiągnięte jako czas odbudowy t_{od} .

Polska Norma [5] wyraźnie podaje zakres badań napięciem stałym oraz wartości jakie przy pomocy tych badań powinny być wyznaczone, a ocena stanu technicznego izolacji ujęta jest w załączniku A normy [5] w formie tabeli 1.

Tabela 1. Ocena wyników badań dodatkowych.

Lp	Parametry układu izolacyjnego	Stan techniczny izolacji				
		dobry	Dostateczny	niedostateczny		
				Izolacja zużyta	Izolacja zużyta	
1	Napięcie przebicia U_p/U_n	>3	>2	<1,5	≈1,5	
2	Rezystancja R_{60N}/U_N przy U_n	>10kΩ/V	>1kΩ/V	>1kΩ/V	>1kΩ/V	
3a	Czas zwarcia t_z [s]	Dla $U_n=6$ kV	≥30	≈10	1	0,1
		Dla $U_n<6$ kV	≥10	≈5	0,5	0,1
3b	Maksymalna wartość napięcia odbudowanego $U_{od\ max}/U_0$	>0	>0	=0	=0	
3c	Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	Dla $U_n=6$ kV	>60	≈30	0	0
		Dla $U_n<6$ kV	>30	≈15	0	0
4	Wahania prądu upływu $\frac{I_{p60\ max} - I_{p60\ min}}{I_{p60\ sr}}$ przy U_n	<1 ± 0,5	<1 ± 2	<1 ± 5	1	
5	$I_{p15}/I_{p60} = R_{60}/R_{15}$	>1,5	>1	≈1	=1	

W opracowaniu [6] wprowadzono punktową ocenę stanu zużycia izolacji opartą o pomiary diagnostyczne stanu izolacji metodą WMPS. W [6] także zdefiniowano punktową ocenę stopnia zużycia izolacji. Wyznaczone pomiarowo charakterystyki i parametry układu izolacyjnego można sklasyfikować punktowo w klasyfikacji od 5 do 0:

5- izolacja bardzo dobra (nowa)

4- izolacja dobra (posiada obniżone parametry odbudowy napięcia i rezystancji),

3- izolacja dostateczna (niskie parametry odbudowy napięcia, co oznacza znaczny stopień jej zużycia lub zabrudzenie),

2- izolacja mniej niż dostateczna (napięcie nie odbudowuje się po czasie zwarcia 1s, stopień zużycia lub zabrudzenia jest duży),

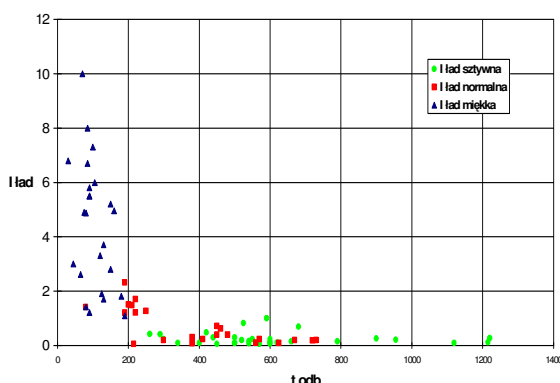
1- izolacja niedostateczna, występuje realne zagrożenie doziemienia uzwojenia w czasie pracy maszyny.

0- trwałe uszkodzenie izolacji (doziemienia, zwarcie zwojowe) stan awaryjny, zużycie izolacji 100%.

W punktowej ocenie zużycia izolacji ocena stanu połączona jest z prognozą. Określa się [6], że maszyny z izolacją ocenioną na 5,4 i 3 będą pracować odpowiednio 5,4 i 3 lata. Praktycznie wyznacza to okresy, po którym należy powtórnie wykonać badania diagnostyczne. Przy ocenie 2 można maszynę warunkowo dopuścić do ruchu, przy ocenie 1 wyłączyć z ruchu, a przynajmniej wyposażyć w wszelkie możliwe zabezpieczenia. W Elektrowni Opole, poczynając od roku 1992, [7] prowadzone są systematycznie pomiary stanu izolacji maszyn elektrycznych napięciem stałym. Przykładowo [8] przedstawiono syntetyczne wyniki badań grupy 80 silników WN o napięciu $U_n = 6$ kV o kilkuletnim lub kilkunastoletnim okresie użytkowania. Silniki te po pomiarach rezystancji izolacji, podzielono na trzy grupy (rys. 1), w zależności od wartości hipotetycznego napięcia przebicia:

- poniżej 18 kV (oznaczenie ▲)
- powyżej 18 kV (oznaczenie ■)
- niewyznaczalnym (oznaczenie ●)

Rys. 1 przedstawia wyniki pomiarów ustalonego prądu upływu, czasu odbudowy napięcia wszystkich osiemdziesięciu silników. Widać wyraźny podział na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią silniki o małym napięciu przebicia, dużym prądzie upływu i krótkich czasach odbudowy.



Rys. 1. Zależność $I_p = f(t_{od})$ dla poszczególnych grup dla silników, podzielonych w zależności od hipotetycznego napięcia przebicia. (prąd w mikroamperach, czas w sekundach)

Drugą stanowią silniki o dużym lub niewyznaczalnym napięciu przebicia, małym prądzie upływu i długich czasach odbudowy. Ponieważ te trzy wielkości wydają się najbardziej przydatne do oceny stanu izolacji, a ponadto zaobserwowano na podstawie wieloletnich pomiarów podobne prawidłowości i korelacje pomiędzy tymi trzema wielkościami, zaproponowano [9], [11] do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych następujący współczynnik diagnostyczny:

$$DF\dot{L} = \frac{I_{pu} U_n}{t_{od} U_p} \left[\frac{\mu A V}{s} \right]$$

Współczynnik diagnostyczny stanowi iloczyn wartości ustalonego prądu upływu w μA i wartości napięcia znamionowego w V podzielony przez iloczyn wartości czasu odbudowy napięcia w sekundach oraz hipotetycznego napięcia przebicia względnego (odniesionego do napięcia znamionowego). W przypadku gdy napięcie przebicia jest niewyznaczalne (bo ekstrapolacja charakterystyki $R_{60}=f(u)$ nie daje punktu przecięcia z osią współrzędnej U) proponuje się przyjąć względne napięcia przebicia równe 3. Ocenę diagnostyczną stanu izolacji przeprowadza się w ten sposób, że wyznaczony $DF\dot{L}$ porównuje się z wzorcowym współczynnikiem izolacji $DF\dot{L}_{wz}$. Im $DF\dot{L}$ ma mniejszą wartość tym stan izolacji jest lepszy. Maszyna o dobrym stanie izolacji winna spełniać warunek:

$$DF\dot{L} < DF\dot{L}_{wz}$$

Wzorcowy wskaźnik izolacji proponuje się wyznaczać na podstawie pomiarów nowej maszyny, wysuszonej, przed jej oddaniem do eksploatacji. W [10] przedstawiono wyniki oceny stanu izolacji metodą WMPS silników indukcyjnych o różnych poziomach napięcia znamionowego.

Tabela 2. Wartości współczynnika stanu izolacji dla przykładowej grupy silników indukcyjnych

Lp	Silnik		I_{pu} [μA]	t_{od} [s]	$\frac{U_{pmax}}{U_n}$	DFŁ	$tg\delta$ [%]	
	Typ	Moc [kW]						
1	2		4	5	6	7	8	
1	SZDr-134s; Nr 18271106		850	6,700	85	3,0	157,6	2,82
2	SZJr-134s; Nr 18271110		850	6,000	105	3,0	114,3	4,0
3	SZJre-134t/04; Nr 18269801		1000	4,950	160	2,4	77,3	12,8
4	SADVdm124r2E; Nr 125750		400	1,650	150	2,5	26,4	10,69
5	SZDr-124U/01; Nr 18138302		650	1,700	220	3,0	15,5	2,16
6	SZJc176tE; Nr 105443		200	1,210	220	3,0	11,0	4,16
7	SZJc176tE; Nr 105444		200	1,270	250	3,0	10,2	3,33
8	SF315X4; Nr 139405		200	0,390	450	3,0	1,7	5,45
9	SCDdm134SE; Nr 132554		800	0,200	670	3,0	0,6	4,80
10	SZJc176tE; Nr 103041		200	0,184	720	3,0	0,5	4,55

W tabeli nr 2 podano, zmierzone metodą WMPS wartości prądu upływu, czasu odbudowy, napięcia przebicia grupy silników indukcyjnych o napięciu znamionowym 6 kV, mocach znamionowych od 1000 kW do 200 kW oraz wyznaczone wartości współczynnika stanu izolacji, które porównano ze zmierzonymi wartościami współczynnika stratności izolacji $tg\delta$ tych silników. Wielokryterialność metody WMPS jest z jednej strony jej zaletą, bo pozwala wszechstronnie ocenić stan izolacji maszyny i zwiększyć w ten sposób pewność oceny, z drugiej jednak stwarza pewną trudność w ocenie, zwłaszcza, gdy jedno lub dwa kryteria nie są spełnione, czasem niewiele odbiegając od wartości wzorcowych. Dlatego celowa wydaje się propozycja zastosowania w metodzie WMPS oceny stanu izolacji w postaci współczynnika stanowiącego jedną wartość liczbową porównywalną z wzorcową.

5. Wnioski

Wydaje się, że metody wykrywania uszkodzeń kłatek oparte na pomiarze „poślizgowych” składowych prądu zasilania są wygodne do stosowania w praktyce i pozwalają na poprawną ocenę stanu klatki.

Metoda termograficzna badań stanu klatki jest dobrym ich uzupełnieniem, bo pozwala na dokładną lokalizację uszkodzenia, ułatwia naprawę klatki, ułatwia diagnozę w przypadku powtarzających się uszkodzeń.

Wielokryterialna metoda WMPS pozwala na pewną ocenę stanu izolacji uzwojeń. Niedogodnością jej jest potrzeba wyłączenia silnika na czas pomiarów. Bardzo wygodnym kryterium stosowanym w tej metodzie jest ocena punktowa, bo zawiera w sobie również pro-

gnozę. Przy stosowaniu oceny punktowej wielką rolę odgrywa jednak doświadczenie oceniającego. Być może pewną obiektywizacją oceny punktowej byłoby wykorzystanie w niej współczynnika diagnostycznego DFŁ w ten sposób, że każdej wartości oceny punktowej przyporządkowano by pewien przedział wartości DFŁ.

Literatura

- [1]. Bernatt M. O awaryjności silników klatkowych wysokiego napięcia. Zeszyty Problemowe KOMEL nr 68/2004, str.37-40.
- [2]. Rams W, Rusek J. Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych. Zeszyty Problemowe KOMEL nr 68/2004, str.1-5.
- [3]. Wajda D: Isledowanija proweznij izolacii. Energia Moskwa 1968.
- [4]. Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. BOBRME KOMEL Katowice 1998
- [5]. PN-E-04700 luty 1998
- [6]. Glinka T.: Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Zeszyty Problemowe KOMEL nr 68/2004, str.13-17
- [7]. Hickiewicz J. i inni: Opracowanie metody i technologii diagnozowania stanu izolacji silników indukcyjnych wysokiego napięcia. Praca naukowo-badawcza dla Elektrowni „Opole” S.A. 1992 r.
- [8]. Ławrowski Z.: Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce. Praca doktorska, Politechnika Śląska Gliwice, 1999r.
- [9]. Zgłoszenie patentowe nr P366882
- [10]. Hickiewicz J., Ławrowski Z: Diagnostyka układów izolacyjnych dla różnych poziomów napięć pracy. Wiadomości Elektrotechniczne 2003 nr 4, str.167-170.
- [11]. Hickiewicz J, Ławrowski Z.:Porównanie kryteriów oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych. WE 2005 nr 4.