

DEGRADACJA IZOLACJI UZWOJEŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH POD WPŁYWEM CZASU ICH EKSPLOATACJI

Tadeusz GLINKA, Artur POLAK, Adam DECNER

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
44-101 Gliwice, ul. Krzywoustego 2, tel. 0-32 237-14-09, tel/fax. 0-32 237-15-07
BOBRME Komel
40-203 Katowice, ul. Roździeńskiego 188, tel 0-32 258-20-41, fax. 0-32 259-99-48

Streszczenie

Wyniki diagnostyki izolacji maszyn elektrycznych przeprowadzonej napięciem stałym umożliwiają wprowadzenie punktowej oceny stopnia degradacji izolacji. W artykule zaproponowano pięciostopniową skalę oceny (tabela 1). Punktowa skala oceny degradacji izolacji została poparta wynikami pomiarów, przeprowadzonych na prądnicach prądu stałego o parametrach: $P_N=4150\text{kW}$; $U_N=730\text{V}$; $n_N=500\text{obr/min}$ (rys. 2-6). W tabeli 2 zestawiono wyniki badań izolacji 20 maszyn przebadanych w 2000 i 2005 roku. Wyższa ocena niektórych maszyn w 2005 roku świadczy o tym, że maszyny zostały przezwojone.

Słowa kluczowe: diagnostyka, izolacja, maszyny elektryczne, degradacja

DEGRADATION OF WINDINGS INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES CONDITIONED BY THE TIME OF EXPLOITING

Summary

Results of dc voltage diagnostic tests of electric machines' insulation (Fig.1) make possible the evaluation of insulation's degree of degradation in accordance with marking system. The paper presents marking system set from 5 to 1 – see Table 1. The relationship between marking system and characteristics/parameters of insulation system has been shown, basing on results of diagnostic tests of armature windings' insulation of dc generator rated at 4150 kW; 730 V; 500 rpm (Figs.2-6). Table 2 gives the marks for technical assessment of insulation of 20 machines tested in 2000 and 2005. If the marks for 2005 are higher than for 2000, then it means that the machines have been rewound.

Keywords: diagnostic, insulation, electrical machines, degradation

1. WSTĘP

W artykule [1] zaproponowano punktową ocenę stanu technicznego izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych:

- 5 – izolacja bardzo dobra,
- 4 – izolacja dobra (posiada obniżone parametry odbudowy napięcia i rezystancji),
- 3 – izolacja dostateczna (małe parametry odbudowy napięcia, co oznacza znaczny stopień jej degradacji),
- 2 – izolacja mniej niż dostateczna (napięcie nie odbudowuje się po czasie zwarcia 1s., stopień zużycia izolacji jest duży),
- 1 – izolacja niedostateczna, występuje realne zagrożenie doziemienia uzwojenia w czasie pracy maszyny,
- 0 – trwałe uszkodzenie izolacji (doziemienie, zwarcie zwojowe), stan awaryjny izolacji 100%.

Powyższa ocena punktowa jest oparta na badaniach diagnostycznych izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych napięciem stałym [2].

W artykule są zaprezentowane wyniki oceny izolacji uzwojeń 20 maszyn elektrycznych dużej mocy zainstalowanych i pracujących od roku 1974 w jednej z fabryk. Badania diagnostyczne izolacji tych maszyn przeprowadzono w roku 2000 i 2005, dało to możliwość spojrzenia, jak czas eksploatacji maszyn wpływa na stopień degradacji izolacji.

2. DIAGNOSTYKA IZOLACJI UZWOJEŃ NAPIĘCIEM STAŁYM

Metoda ta obejmuje trzy próby:

- wyznaczenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$, o ile jest to możliwe w przedziale napięcia od zera do $2U_N$,
- zdjęcie przebiegu czasowego prądu upływu i_p po skokowym załączeniu, na całkowicie rozładowany układ izolacyjny, napięcia

stałego o wartości znamionowej $U_o = U_N$ bądź wyższej,

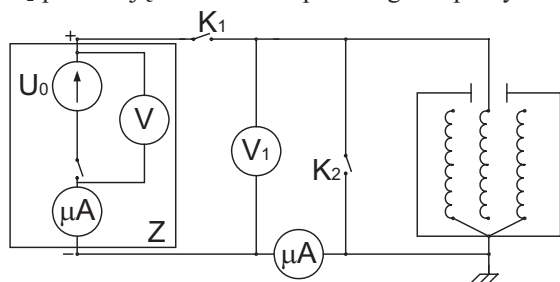
- naładowanie układu izolacyjnego do napięcia $U_o \geq U_N$ (do stanu ustalonego), następnie odłączenie napięcia zasilającego i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z po czym rozwarcie układu izolacyjnego i zdjęcie przebiegu odbudowy napięcia na układzie izolacyjnym $U_{od}(t)$.

Pierwsze dwie próby są powszechnie stosowane w badaniach okresowych izolacji, gdyż są zalecane w instrukcjach eksploatacji maszyn elektrycznych. Jednak zakres tych prób ogranicza się zwykle do jednej wartości napięcia 2500V, 1000V bądź 500V. W polecanym programie badań diagnostycznych rozszerza się zakres tych prób na wyznaczenie charakterystyki $R_{60} = f(U)$ o ile jest to możliwe do $2U_N$ i wyznaczenie $i_p = f(t)$ przy U_N .

Próba trzecia została zaproponowana przez prof. T. Glinkę i znalazła uznanie w Ośrodkach Pomiaru i Automatyki zajmujących się diagnostyką maszyn elektrycznych w kopalniach. Dzięki ich poparciu została wpisana do Polskiej Normy PN-E-04700 z 1998 roku jako próba dodatkowa [3].

Badanie odbudowy napięcia (próba trzecia) jest próbą najważniejszą dla diagnostyki stanu technicznego izolacji i oceny stopnia jej zużycia.

Badania przeprowadza się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.1. Podstawowym elementem tego układu jest zasilacz Z napięcia stałego o wartości regulowanej w przedziale od zera do $2U_N$ mikroamperomierz i woltomierz elektrostatyczny oraz wyłączniki K_1 i K_2 pozwalające realizować poszczególne próby.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do diagnostyki stanu technicznego izolacji

W oparciu o przeprowadzone pomiary wyznacza się następujące charakterystyki i parametry układu izolacyjnego:

- wykres rezystancji izolacji $R_{60} = f(U)$ w zakresie napięcia od 0 do $2U_N$ z którego określa się rezystancję R_{60} przy U_N ,
- z ekstrapolacji krzywej $R_{60} = f(U)$ szacuje się poziom napięcia przebicia U_p układu izolacyjnego,
- wykres odbudowy napięcia $U_{od}(t)$ na układzie izolacyjnym, z którego odczytuje się czas odbudowy t_{od} i wartość maksymalną odbudowanego napięcia $U_{od,max}$,

max,

- współczynnik absorpcji układu izolacyjnego i_{p1}/i_{p60} ,
- poziom wahań prądu upływu $i_{p60,max}$ i $i_{p60,min}$ liczony po czasie $t > 60s$ od chwili załączenia napięcia (tzn. dla stanu ustalonego).

Próby odbudowy napięcia autorzy standardowo robią przy parametrach:

- dla uzwojeń wysokonapięciowych $U_N \geq 6$ kV, próbę przeprowadza się przy $U_o = 6kV$; $t_z = 30s.$, jeśli napięcie na układzie izolacyjnym po rozwarciu nie odbudowuje się to skraca się czas zwarcia do 10s, jeśli napięcie dalej nie odbudowuje się to próbę zwarcia skraca się do 1s.,
- dla uzwojeń o napięciu znamionowym 6kV $> U_N \geq 500V$ próbę przeprowadza się przy $U_o = U_N$, a dla uzwojeń o napięciu znamionowym $U_N < 500V$, próbę przeprowadza się przy napięciu $U_o = 500V$. Czas zwarcia standardowo przyjmuje się $t_z = 10s$. Jeśli napięcie nie odbudowuje się, to czas zwarcia skraca się do ok. 1s, jeśli dalej napięcie nie odbudowuje się, to można określić czas zaniku napięcia na układzie izolacyjnym po wyłączeniu zasilania.

W tabeli 1 scharakteryzowano ocenę punktową stopnia degradacji izolacji w oparciu o wyznaczone parametry kryterialne.

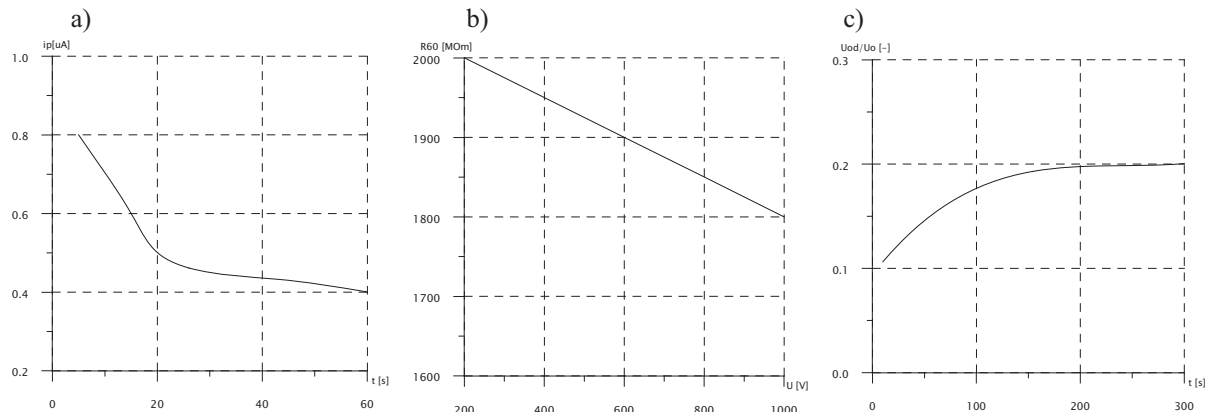
Ocena napięcia przebicia jest ważnym parametrem diagnostycznym. Napięcie przebicia $U_p \leq U_N$ może wystąpić w mocno zdegradowanej izolacji uzwojeń w maszynach prądu stałego. Stan taki autorzy wielokrotnie stwierdzili, także w maszynach, których wyniki są prezentowane w tym artykule, mimo to maszyny te pracują, narażone są jednak na wystąpienie doziemienia.

W oparciu o wartość rezystancji izolacji można ocenić czy izolacja nie jest zawilgocona, natomiast nie można, nawet w przybliżeniu, ocenić stopnia degradacji izolacji. Izolacja zużyta (ocena 1) może mieć rezystancję nawet kilkaset kΩ/V. Natomiast izolację zawilgoconą trudno jest sklasyfikować, najpierw należy ją wysuszyć, a następnie wykonać pomiary diagnostyczne. Sam fakt, że jeśli maszyna stoi (np. miesiąc) w pomieszczeniu w miarę suchym, a izolacja wchłania wilgoć i rezystancja jej spada, świadczy, że stopień jej degradacji jest znaczny (ocena co najwyżej 3).

Poszczególne stopnie charakteryzujące stan techniczny izolacji zostały porównane na rysunkach 2-6. Na rysunkach tych przedstawiono pomierzone charakterystyki układu izolacyjnego uzwojenia twornika pięciu identycznych prądnic prądu stałego: 4150kW; 730V; 500 obr/min. Układ izolacyjny każdej z tych prądnic ma inną ocenę punktową. Tak, więc wielkości kryterialne zaproponowane w tabeli 1 mają na rysunkach 2-6 ilustrację graficzną charakteryzującą stan techniczny izolacji uzwojeń maszyn rzeczywistych.

Tabela 1. Kryteria oceny wyników badań

Lp	Parametr układu izolacyjnego	Ocena stanu technicznego izolacji					
		5	4	3	2	1	izolacja zawilgoc na
1	Napięcie przebicia U_p/U_N	>3	>3	>2	~1,5	~1	~1
2	Rezystancja R_{60N}/U_N [kΩ/V]	przy $U_N = 6kV$ >50	przy $U_N = 6kV$ >20	przy $U_N = 6kV$ >10	przy $U_N = 6kV$ >10	przy $U_N = 6kV$ >10	przy $U_N = 6kV$ <3
		przy $U_N < 1kV$ >50	przy $U_N < 1kV$ >20	przy $U_N < 1kV$ >10	przy $U_N < 1kV$ >3	przy $U_N < 1kV$ >1	przy $U_N < 1kV$ <1
3a	Czas zwarcia dla t_z [s]	dla $U_N = 6kV$ 30	dla $U_N = 6kV$ 30	dla $U_N = 6kV$ 30	dla $U_N = 6kV$ 1	dla $U_N = 6kV$ 1	dla $U_N = 6kV$ 0
		dla $U_N < 6kV$ 10	dla $U_N < 6kV$ 10	dla $U_N < 6kV$ 10	dla $U_N < 6kV$ 1	dla $U_N < 6kV$ 0	dla $U_N < 6kV$ 0
3b	Maksymalna wartość odbudowanego napięcia U_{odmax}/U_o	>0,1	≥0,1	≥0,05	≥0,01	0	0
	Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	dla $U_N = 6kV$ >240	dla $U_N = 6kV$ >120	dla $U_N = 6kV$ >30	dla $U_N = 6kV$ ~10	dla $U_N = 6kV$ 0	dla $U_N = 6kV$ 0
		dla $U_N < 1kV$ >120	dla $U_N < 1kV$ >60	dla $U_N < 1kV$ >15	dla $U_N < 1kV$ ~5	dla $U_N < 1kV$ 0	dla $U_N < 1kV$ 0
4	Wahania prądu upływu przy U_N $\frac{i_{p60max} - i_{p60min}}{i_{p60sr}}$	<0,5	<1	>1	>1	>2	0
5	i_{p15}/i_{p60}	$U_N = 6kV$ >1,5	$U_N = 6kV$ >1,2	$U_N = 6kV$ >1	$U_N = 6kV$ 1	$U_N = 6kV$ 1	$U_N = 6kV$ 1
		$U_N < 1kV$ >1,3	$U_N < 1kV$ >1,1	$U_N < 1kV$ >1	$U_N < 1kV$ 1	$U_N < 1kV$ 1	$U_N < 1kV$ 1



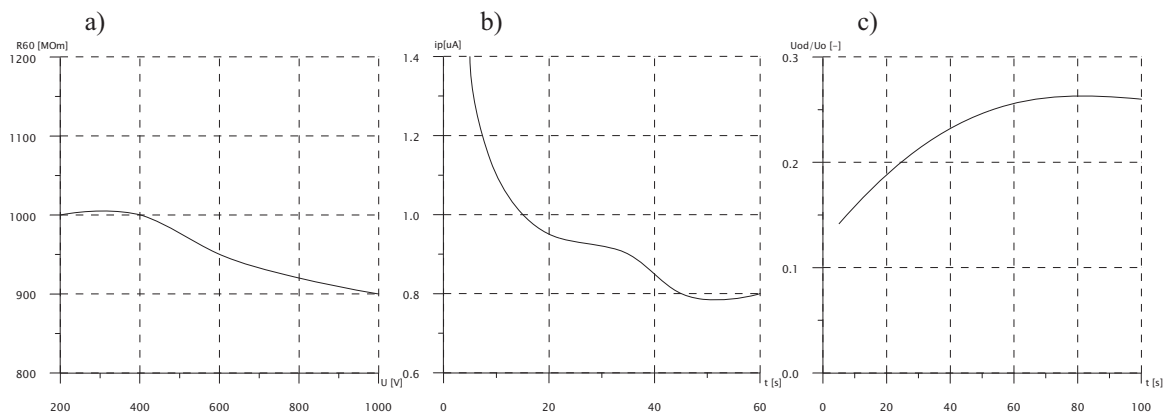
Rys. 2. Prądnica nr 700888. Ocena stanu technicznego układu izolacyjnego „5”

a – wykres $R_{60} = f(U)$, $R_{60} = 1863 \text{ M}\Omega$ przy $U = U_N$;

b – przebieg $i_p = f(t)$ przy $U_o = 750 \text{ V}$, $i_{15}/i_{60} = 1.6$;

c – przebieg $U_{od} = f(t)$ przy: $U_o = 750 \text{ V}$, $t_z = 30 \text{ s}$.

Parametry odbudowy napięcia: $t_{od} = 240 \text{ s}$; $U_{odmax} = 150 \text{ V}$



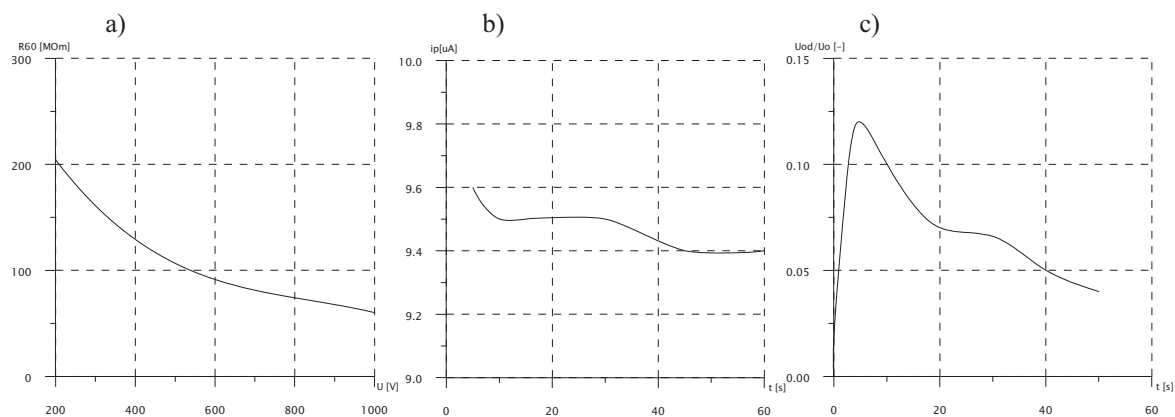
Rys. 3. Prądnica nr 710054. Ocena stanu technicznego układu izolacyjnego „4”

a – wykres $R_{60} = f(U)$, $R_{60} = 930 \text{ M}\Omega$ przy $U = U_N$;

b – przebieg $i_p = f(t)$ przy $U_o = 750 \text{ V}$, $i_{15}/i_{60} = 1.25$;

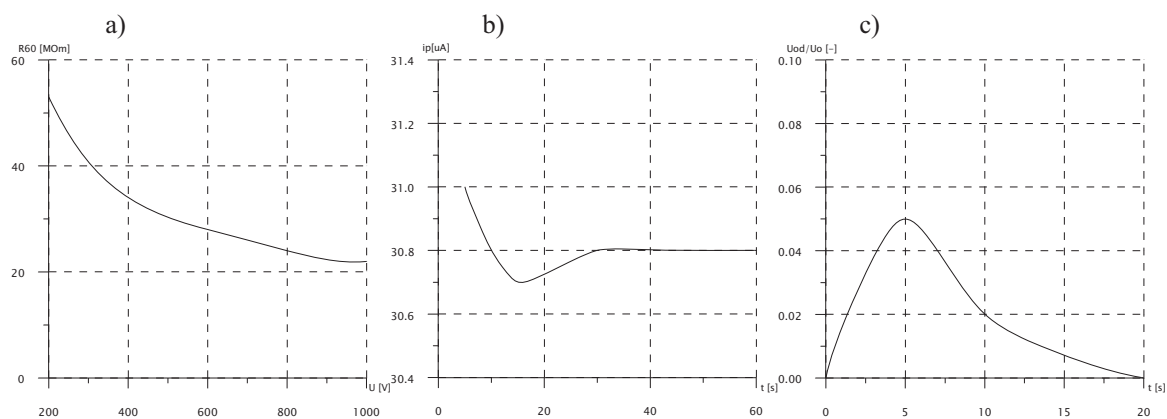
c – przebieg $U_{od} = f(t)$ przy: $U_o = 750 \text{ V}$, $t_z = 30 \text{ s}$.

Parametry odbudowy napięcia: $t_{od} = 70 \text{ s}$; $U_{odmax} = 195 \text{ V}$



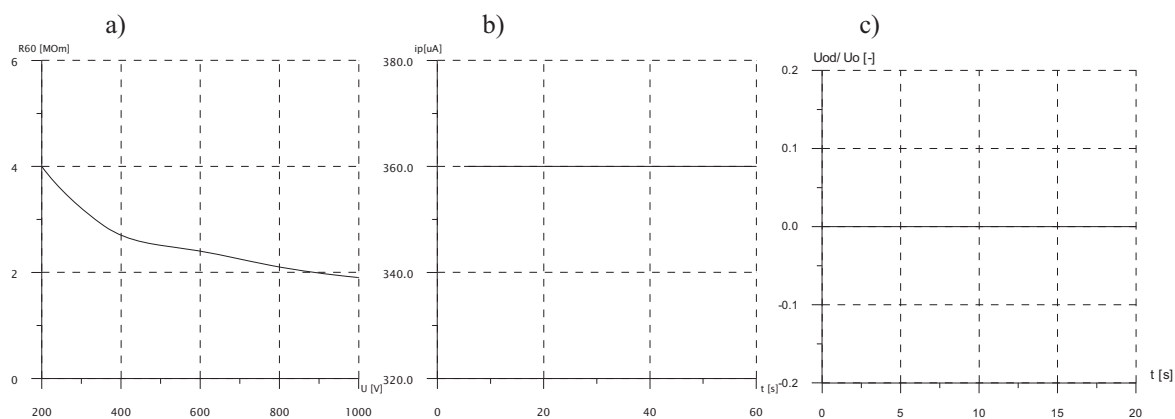
Rys. 4. Prądnica nr 730299. Ocena stanu technicznego układu izolacyjnego „3”

- a – wykres $R_{60} = f(U)$, $R_{60} = 79 \text{ M}\Omega$ przy $U = U_N$;
 - b – przebieg $i_p = f(t)$ przy $U_o = 750 \text{ V}$, $i_{15}/i_{60} = 1.01$;
 - c – przebieg $U_{od} = f(t)$ przy: $U_o = 750 \text{ V}$, $t_z = 10 \text{ s}$.
- Parametry odbudowy napięcia: $t_{od} = 5 \text{ s}$; $U_{odmax} = 90 \text{ V}$



Rys. 5. Prądnica nr 710108. Ocena stanu technicznego układu izolacyjnego „2”

- a – wykres $R_{60} = f(U)$, $R_{60} = 25 \text{ M}\Omega$ przy $U = U_N$;
 - b – przebieg $i_p = f(t)$ przy $U_o = 750 \text{ V}$, $i_{15}/i_{60} = 1$;
 - c – przebieg $U_{od} = f(t)$ przy: $U_o = 750 \text{ V}$, $t_z = 1 \text{ s}$.
- Parametry odbudowy napięcia: $t_{od} < 5 \text{ s}$; $U_{odmax} = 38 \text{ V}$



Rys. 6. Prądnica nr 710053. Ocena stanu technicznego układu izolacyjnego „1”

- a – wykres $R_{60} = f(U)$, $R_{60} = 2.2 \text{ M}\Omega$ przy $U = U_N$;
- b – przebieg $i_p = f(t)$ przy $U_o = 750 \text{ V}$, $i_{15}/i_{60} = 1$;
- c – brak odbudowy napięcia, po wyłączeniu napięcia, napięcie na układzie izolacyjnym zanika w czasie $t < 1 \text{ s}$

3. WYNIKI BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH UKŁADU IZOLACYJNEGO MASZYN WYKONANYCH W ROKU 2000 i 2005

Przedmiotem badań diagnostycznych jest ten sam zespół 20 maszyn elektrycznych, w tym:

- 4 silniki synchroniczne: 7000 kW; 6kV; 500obr/min.,
- 8 prądnic prądu stałego: 4150 kW; 730V; 500 obr/min.,
- 4 silniki prądu stałego: 3250 kW; 730 V; 55/120 obr/min.,
- 4 silniki prądu stałego: 3000 kW; 58V; 40/80 obr/min.

Na podstawie przeprowadzonych badań diagnostycznych w roku 2000 i 2005 stan techniczny izolacji maszyn sklasyfikowano, a wyniki zestawiono w tabeli 2.

Maszyny, których układ izolacyjny sklasyfikowano w roku 2000 oceną „1” zostały wyremontowane (przeizolowane). Obecnie maszyny te mają układ izolacyjny z oceną „5” lub „4”. Izolacja większości uzwojeń, które nie były wymieniane, obniżyła się o jeden stopień.

Tabela 2. Stopień zużycia izolacji uzwojeń

Silników synchronicznych typ MC 325 – 12/12				
Lp.	Numer fabryczny maszyny	Stan techniczny izolacji uzwojeń 2000/05		
		twornik	wzbudzenie	
1.	700 887	4/4	4/3	
2.	710 052	4/4	2/4	
3.	730 244	4/4	3/3	
4.	710 107	4/4	1/3	
Prądnic prądu stałego typ P21-35-17K				
Lp.	Numer fabryczny maszyny	Stan techniczny izolacji uzwojeń 2000/05		
		Wirnik A1A2	stojan	
			B1C2	F1F2
1.	710 054	1/4	1/5	3/4
2.	700 888	1/5	1/5	4/5
3.	710 013	1/1	1/1	2/2
4.	710 053	3/1	2/1	5/4
5.	700 889	1/5	1/5	2/5
6.	730 299	4/3	5/3	4/3
7.	710 108	3/2	3/1	4/2
8.	710 014	2/1	2/3	4/4
Silników walcowniczych 2PP				
Lp.	Numer fabryczny maszyny	Stan techniczny izolacji uzwojeń 2000/05		
		Wirnik A1A2	stojan	
			B1C2	F1F2
1.	720 161	4/5	4/5	4/4
2.	720 160	4/5	4/4	3/4
3.	720 486	5/5	5/5	5/4
4.	720 487	3/3	5/4	5/4
5.	720 305	1/5	5/4	5/4
6.	720 306	5/5	5/5	5/4
7.	720 630	5/5	5/5	5/4
8.	720 631	5/5	5/5	5/4

4. WNIOSKI

Wyniki badań diagnostycznych izolacji uzwojeń napięciem stałym (rys.1) umożliwiają ocenę punktową stopnia jej degradacji. W artykule przedstawiono taką ocenę w skali od 5 do 1 – tabela 1. Na przykładzie wyników badań diagnostycznych izolacji uzwojeń twornika identycznych prądnic prądu stałego (4150kW; 730V; 500obr/min) pokazano związek między oceną punktową, a charakterystykami i parametrami układu izolacyjnego (rys. 2-6).

W tabeli 2 zestawiono ocenę punktową stanu technicznego 20 maszyn badanych w roku 2000 i 2005. Maszyny, których stan izolacji w roku 2000 oceniono na „1” były naprawione (wymieniono uzwojenia), stąd ocena ta w roku 2005 jest wyższa „5” lub „4”. Maszyny, które nie były naprawiane w większości przypadków mają obniżoną w roku 2005, ocenę stanu technicznego izolacji w stosunku do oceny z roku 2000. Ekipa wykonująca pomiary diagnostyczne w 2005r nie знаła wyników badań z 2000r i nie wiedziała, które maszyny były naprawiane.

LITERATURA

- [1] Glinka T.: Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Przegląd Elektrotechniczny PL ISSN 0033-2097 Nr.9/2004, s.852 – 855.
- [2] Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Wyd. BOBRME Komel w Katowicach ISBN 83-910585-4-9, 2002r.
- [3] PN-98/E-04700. Urządzenia i układy elektryczne. Wytyczne przeprowadzenia pomontażowych badań odbiorczych.



GLINKA Tadeusz, prof.
dr hab. inż., Politechnika
Śląska, członek SEP



POLAK Artur, dr inż.,
BOBRME Komel
Katowice, Kierownik
Laboratorium Maszyn
Elektrycznych, członek
SEP



DECNER Adam, mgr
inż., BOBRME Komel
Katowice, specjalista
pomiarowiec, członek
SEP