

Tadeusz Glinka, Artur Polak

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

NARAŻENIE MASZYN ELEKTRYCZNYCH W CZASIE POSTOJÓW

EXPOSURE OF ELECTRIC MACHINES DURING STOPPAGES

Streszczenie: Producenci maszyn elektrycznych w Dokumentacji Techniczno-Ruchowej (DTR), zabezpieczają warunki gwarancji. Jeśli właściciel silnika nie przestrzega zaleceń eksploatacyjnych podanych w DTR, to producent silnika odmawia uznania gwarancji. Sprawa trafia do Sądu. Biegły sądowy lub Ekspert, w oparciu o ograniczone informacje o eksploatacji i awarii silnika, opracowuje Opinię. W artykule przedstawiono przykład takiej sprawy i konkluzję Opinii Biegłego Sądowego.

Abstract: Manufacturers of electrical machines, in the Operation and Maintenance Documentation, provide the warranty conditions. If the engine owner does not comply with the operating recommendations given in the Operation and Maintenance Manual, the engine manufacturer refuses to accept the warranty. The case goes to the Court. A forensic expert or an expert prepares Opinions based on limited information on the operation and failure of the engine. The article presents an example of such a case and the conclusion of the Opinion of a court expert.

Słowa kluczowe: silniki indukcyjne klatkowe, awaria silnika, Opinia Biegłego Sądowego

Keywords: squirrel-cage induction motors, motor failure, Opinion of a forensic expert

1. Izolacja uzwojeń

Uzwojenie maszyn elektrycznych, w zakresie mocy 200 - 4500 kW, 6 kV, jest dwuwarstwowe pętlicowe, zezwoje są ułożone w żłobkach prostokątnych zamkniętych klinami. Przewody miedziane są profilowane o przekroju prostokątnym. Układ izolacyjny uzwojeń składa się z izolacji zwojowej i izolacji głównej. Izolacja zwojowa rozdziela przewody tego samego zezwoju między sobą. Izolacja główna separuje uzwojenie od żłobków, a na czołach między zezwojami i fazami. Izolacja ma klasę temperaturową B (130°C) lub F (155°C). Izolacja zwojowa to najczęściej lakier lub taśma izolacja Nomex lub Kapton. Izolacja główna jest warstwowa wykonana z materiałów o nazwach firmowych, np. epoxy-mika-tkanina szklana; nomex – folia PET (poliester)-nomex; nomex - folia kapton – nomex; nomex - tkanina szklana – nomex. Fabryki maszyn elektrycznych obecnie stosują jedną z dwóch technologii zespalandia, nałożonych na zezwoje, warstw. Na powierzchni zewnętrznej izolacji zezwojów jest nałożona warstwa ochronna przeciwjarzeniowa, jest to lakier lub taśma półprzewodząca. Izolacja uzwojeń maszyn elektrycznych wykonana według tych technologii ma bardzo dobre parametry: napięcie przebicia, rezystancję i $tg\delta$.

Na stanowisku pracy maszyny elektrycznej izolacja uzwojenia jest narażona na działanie:

- pola elektrycznego, które generuje wyładowania niezupełne,
- zmiany temperatury uzwojenia,
- drgań mechanicznych,
- warunków otoczenia (temperaturę, wilgotność, zapylenie).

Warunki te oddziałują na łożyska i układ izolacyjny maszyny.

2. Kondycja izolacji uzwojenia

2.1. Zawilgocenie izolacji

Zjawisko zawilgocenie izolacji przebiega następująco: silnik pracujący nagrzewa się, nagrzewa się także powietrze w silniku, po wyłączeniu silnika temperatura powietrza obniża się i powstaje podciśnienie, powietrze wilgotne z zewnątrz jest zasysane do silnika, początkowo nagrzewa się o następnie stygnie, jeśli temperatura obniży się poniżej temperatury punktu rosy, kropelki wody osiadają na powierzchniach wewnętrznych silnika w tym na czołach uzwojenia, a cząsteczki wody przenikają w głąb układu izolacyjnego. Producenci silników w dokumentacji techniczno-ruchowej DTR, zwracają uwagę na warunki magazynowania, poprawną instalację na stanowisku pracy i eksploatację silnika. Uznanie ewentualnej reklamacji jest uzależnione od dotrzymania warunków podanych w DTR [4, 7].

2.2. Pomiar rezystancji izolacji

W czasie magazynowania i długich postojów silnika, np. miesiąc i dłuższych, konieczne jest przed załączeniem silnika zmierzenie rezystancji izolacji uzwojenia. Do przeprowadzenia pomiaru silnik musi być przygotowany:

- odłączony od zasilania, wirnik nieruchomy, kable zasilające i wszelkie, urządzenia zewnętrzne odłączone,
- jeśli fazy można rozdzielić, to należy je rozłączyć,
- obudowa i fazy nie mierzone powinny być uziemione.

Rezystancję izolacji mierzymy napięciem stałym, jeśli to możliwe $U_p = U_N$ lub megaomierzem napięciem jak w tabeli 1. Odczyt rezystancji izolacji należy wykonać po 15 sek (R_{15}) i po 60 sek. (R_{60}). Czas liczymy od chwili przyłożeniu napięcia do uzwojenia. Jeśli fazy uzwojenia są rozłączone, to mierzymy rezystancję izolacji każdej fazy oddzielnie. Pomiar ten umożliwia porównanie rezystancji izolacji między poszczególnymi fazami. Jeśli faz uzwojenia nie można rozdzielić, to mierzymy rezystancję izolacji wszystkich faz względem obudowy. W czasie pomiaru zapisujemy warunki środowiskowe: temperaturę i wilgotność.

Tabela 1. Wartość napięcia megaomierza

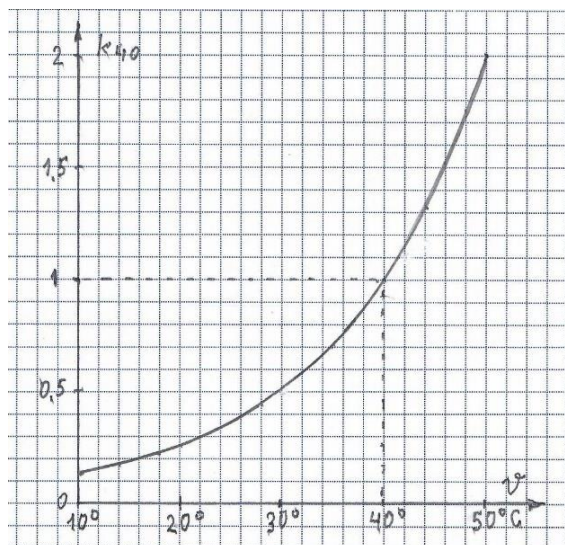
Lp	U_N [V]	U_p [V]
1	<1 000	500
2	1 000 – 2 500	500 – 1 000
3	2 500 – 5 000	1 000 – 2 500
4	5 000 – 10 000	2 500 – 5 000
5	>10 000	$0,5U_N$

Zmierzoną wartość rezystancji izolacji R_{60}^{ϑ} w temperaturze ϑ przeliczamy na umowną temperaturę otoczenia $\vartheta = 40^{\circ}\text{C}$.

$$R_{60}^{40} = R_{60}^{\vartheta} k_{\vartheta}$$

Wartość współczynnika k_{ϑ} przedstawiono na rys. 1. Wartości referencyjne parametrów układu izolacyjnego podano w tabeli 2.

Parametry $\frac{R_{60}^{40}}{U_N}$ i $\frac{R_{60}^{\vartheta}}{R_{15}^{\vartheta}}$ są bieżącą oceną układu izolacyjnego w oparciu o którą podejmuje się decyzje załączenie silnika. Pełna ocena diagnostyczna izolacji uzwojenia wymaga szerszych pomiarów [2].



Rys. 1. Współczynnik k_{ϑ} przeliczenia rezystancji na temperaturę 40°C

Tabela 2.

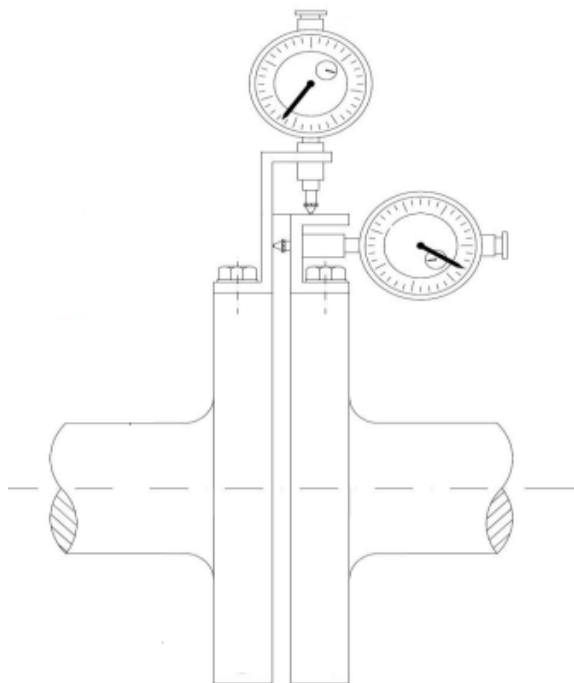
Lp	Izolacja → Parametr ↓	dobra	zadawała jąca	niedostateczna	
				zużyta	zawilgocon a
1	$\frac{R_{60}^{40}}{U_N}$ [kΩ/V]	> 100	10 ÷ 100		< 3
2	$\frac{R_{60}^{\vartheta}}{R_{15}^{\vartheta}}$	$1,5 \div 2$	> 1.2	1	1

3. Instalacja silnika

Silnik, do czasu zainstalowania na stanowisku pracy, należy umieścić w pomieszczeniu o wilgotności względnej nie większej niż 60% i temperaturze w przedziale $5 - 40^{\circ}\text{C}$. Wał powinien być pokryty smarem i zabezpieczony osłoną. Aby utrzymać odpowiedni poziom rezystancji izolacji uzwojenia grzejnik przeciwkondensacyjny, jeśli jest, powinien być włączony. Grzejnik przeciwkondensacyjny należy załączać także w czasie dłuższych przerw (np. weekendowych) w eksploatacji silnika.

Silnik na stanowisku pracy musi być dokładnie ustawiony. Silnik montowany na ramie fundamentowej z łożyskami umieszczonymi na kołach powinien być wypoziomowany z tolerancją ($\pm 0,1$) mm, tolerancja ustawienia szczeliny między wirnikiem i stojanem ($\pm 0,1$) mm i tolerancja osiowego przesunięcia jarzma wirnika względem jarzma stojan ($\pm 0,1$) mm. Oś wału silnika powinna leżeć na jednej prostej z osią wału napędzanej maszyny roboczej. Ustawienie osiowania należy wykonywać przy pomocy precyzyjnych narzędzi np. przyrządów laserowych lub czujników zegarowych. Dopuszczalne

mimośród przy pełnym obrocie wału nie powinien przekraczać 0,03 mm – rys. 2. Między sprzęgłami powinien być odstęp na dylatację termiczną wałów.



Rys. 2. Sprawdzenie mimośrodu na sprzęgle czujnikiem zegarowym [4]

Nie dotrzymanie dopuszczalnych tolerancji montażowych silnika i osiowego ustawienia wałów, skutkuje zwiększonymi drganiami i przyspieszonym zużyciem się łożysk, a nawet urwaniem wału – rys. 3.

Poprawne zainstalowanie silnika należy potwierdzić protokołem z pomiarów drgań. Zgodnie z normą IEC 60034-14 prędkość drgań RMS (średnia kwadratowa) nie powinna przekraczać wartości podanych w tabeli 3.

a)



b)



Rys. 3. Uszkodzenia mechaniczne: a) łożyska walczkowe walcowe, b) urwana końcówka wału silnika [1]

Tabela 3. Średnia kwadratowa prędkość drgań

Wznios wału [mm]	$56 \leq H \leq 132$	$132 \leq H \leq 280$	$H > 280$
→			
Klasa wibracji ↓	Prędkość drgań [mm/s, RMS]		
A	1,6	2,2	2,8
B	0,7	1,1	1,8

Jeśli silnik jest wyposażony w czujniki pomiarowe temperatury (Pt-100, termistory) to należy je podłączyć i ustawić zabezpieczenie dwupoziomowo: sygnalizacja i wyłączenie. Wartości temperatur alarmu i wyłączenia są związana z klasą izolacji uzwojenia silnika. Wartości maksymalne temperatury aktywujące zabezpieczenie podano w tabeli 4.

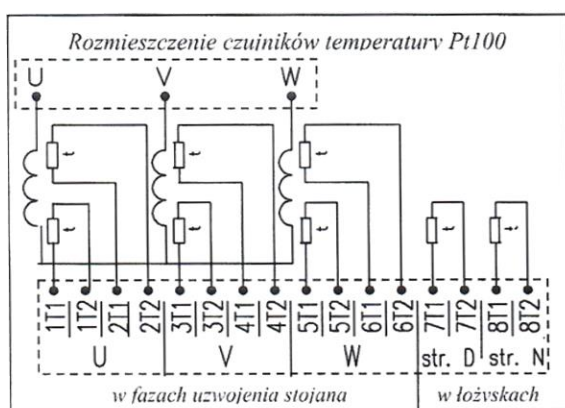
Tabela 4. Temperatury maksymalne aktywacji zabezpieczenia

Czujniki na	Klasa izolacji	Temperatura [°C]	
		Sygnalizacja	Wyłączenie
Uzwojeniu	B	110	130
	F	130	155
	H	155	180
Łożyskach	B, F, H	110	120

4. Przykład awarii silnika

Każda awaria silnika ma jakąś przyczynę. Jeśli silnik jest na gwarancji, to właściciel silnika stara się obciążyć kosztami producenta. Producent silnika daje gwarancję poprawnego jego działania, zabezpieczając się Dokumentacją Techniczno-Ruchową DTR, która dołączona do Umowy sprzedaży ma moc prawną. Gdy producent silnika nie uzna gwarancji sprawa trafia do Sądu. Sąd rozstrzyga kto przekroczył prawo bazując na opinii biegłych sądowych lub Ekspertów. Biegły sądowy ma niejednokrotnie trudne zadanie, gdyż zazwyczaj dokumentacja

sądowa jest niepełna. Powód w pozwie dołącza tylko te dokumenty, które dla niego są korzystne. Autor zna przypadek, że przebiegi czasowe prądów i napięcia zarejestrowane przed i w czasie awarii są obrabiane aby wymazać przyczynę awarii, co przy zapisie cyfrowym sygnałów nie jest trudne do zrobienia i w tej formie są w aktach sądowych sprawy. Jednym z przykładów jest sprawa awarii silnika indukcyjnego klatkowego typ Sh 400H4 Em: 560 kW, 6000 V, prędkość synchroniczna 1 500 obr/min. Silnik ma zabudowane grzałki i czujniki temperatury PT-100: 6 czujników jest zainstalowanych w żłobkach i 2 czujniki są zainstalowane w łożyskach - rys. 4.



Rys. 4. [7]

Dokumentacji z awarii silnika jest bardzo skromna i wynika z niej jedynie, że silnik uległ uszkodzeniu w wyniku którego konieczne było przewojenie silnika. Kolejność zadziałania zabezpieczeń silnika i naprawa silnika wymagająca przewojenia dowodzi, że przyczyną awarii było zwarcie w uzwojeniu. Nie można stwierdzić czy zwarcie zwojowe było pierwsze, a następnie było doziemienie izolacji głównej powodując wyłączenie silnika, czy wystąpiło tylko zwarcie izolacji głównej.

Biegły sądowy w swojej opinii stwierdził, że „został popełniony błąd polegający na niestarym przygotowaniu silnika do uruchomienia.”

Zostały naruszone następujące zasady:

- niezgodna z dokumentacją DTR pkt. 4 procedura uruchamiania silnika po dłuższej przerwie. Długość przerwy dla maszyn nie jest zdefiniowana i zależy od warunków pracy: stopnia obciążenia, okresowych przeciążeń, warunków zewnętrznych środowiska, wieku maszyny i jej aktualnego stanu technicznego.

- uzwojenie stojana uszkodzonego silnika zostało wyposażone w ochronę termiczną (dwa obwody termorezystorów Pt-100) oraz podgrzewacze uzwojenia (grzałki antykondensacyjne). Podczas pomiarów kontrolnych wspomniane obwody nie podlegały sprawdzeniu. Wymóg taki producent nakłada na użytkownika w dokumentach DTR – Ogólne wymagania techniczne. Punkt 1. (str. 103) brzmi: *Przed pierwszym uruchomieniu silnika oraz po dłuższym postoju należy sprawdzić stan izolacji uzwojeń silnika (oraz czujników temperatury i grzałek, jeśli są zainstalowane).* Należy podkreślić jeśli są zainstalowane, nie muszą być używane (np. podłączone do źródła zasilania) ale jeśli są w maszynie muszą podlegać kontroli. Przedmiotowy silnik został w takie grzałki wyposażony oraz w czujniki temperatury. Wymagania te zostały zamieszczone przez producenta silnika zgodnie z obowiązującą normą: PN-EN ICE 60034-24-4.

W swojej opinii Biegły wyjaśnia, że silnik został naprawiony bez opisu uszkodzenia. Nie zostało zlokalizowane miejsce wystąpienia zwarcia, zatem nie można określić bezpośredniej przyczyny uszkodzenia. Przed załączeniem silnika nie zmierzono rezystancji izolacji. Biegły przyjął hipotezę, że przyczyną awarii było zwarcie na uzwojeniu spowodowane prawdopodobnie zawilgoconiem izolacji. Zawilgocona izolacja w silniku zimnym ma rezystancję umożliwiającą załączenie i pracę silnika. Potwierdza to współczynnik k_{40} – rys.1. Na przykład silnik po dłuższym postoju miał temperaturę otoczenia $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$, zmierzona rezystancja izolacji uzwojenia $R_{60}^{20} = 18 \text{ k}\Omega$, Rezystancja ta przeliczona na temperaturę 40°C wynosi

$$R_{60}^{40} = R_{60}^{20} k_{40}^{20} = 18 \cdot 0,25 = 4,5 \text{ k}\Omega$$

z rys. 1 współczynnik $k_{40}^{20} = 0,25$.

Rezystancja R_{60}^{40} podziela przez napięcie znamionowe $U_N = 6000 \text{ V}$ wynosi

$$\frac{R_{60}^{40}}{U_N} = \frac{4,5}{6} = 0,75 \text{ M}\Omega/\text{V}$$

Jeśli silnik z taką rezystancją izolacji załączyć do sieci, to w temperaturze $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ silnik pracuje, lecz z upływem czasu uzwojenie grzeje się, temperatura izolacji rośnie, gdy uzwojenie osiąga temperaturę np. 40°C , rezystancja izolacji uzwojenia zmniejsza się do $4,5 \text{ k}\Omega$ i natężenie

poła elektrycznego powoduje przebicie izolacji. W stosunkowo krótkim okresie czasu pracy silnika, w przypadku podmiotowego silnika około 1 godz., spadek rezystancji jest tak duży, że wystąpiło przebicie izolacji do masy i między fazami. Sam przebieg awarii jest mniej istotny. Faktem jest, że silnik nie powinien być dopuszczony do ruchu bez pomiarów parametrów izolacji i bez oceny spełnienia warunków podanych w DTR - tabela 2. Wyniki negatywne poprawnie wykonanych pomiarów parametrów izolacji R_{60} i $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ są wskaźnikami, że silnik należy suszyć i nie wolno go załączać do pracy.

Silnik uległ uszkodzeniu w wyniku którego konieczne było jego przezwojenie. Kolejność zadziałania zabezpieczeń silnika i naprawa silnika wymagająca przezwojenia dowodzi, że przyczyną awarii było zwarcie w uzwojeniu. Nie można stwierdzić czy zwarcie zwojowe było pierwsze, a następne było doziemienie izolacji głównej powodując wyłączenie silnika, czy wystąpiło tylko zwarcie izolacji głównej.

Biegły sądowy w swojej opinii stwierdził, że „został popełniony błąd polegający na niestarym przygotowaniu silnika do uruchomienia.”

Zostały naruszone następujące zasady:

- niezgodna z dokumentacją DTR pkt. 4 procedura uruchamiania silnika po dłuższej przerwie. Długość przerwy dla maszyn nie jest zdefiniowana i zależy od warunków pracy: stopnia obciążenia, okresowych przeciążeń, warunków zewnętrznych środowiska, wieku maszyny i jej aktualnego stanu technicznego.
- uzwojenie stojana uszkodzonego silnika zostało wyposażone w ochronę termiczną (dwa obwody termorezystorów Pt-100) oraz podgrzewacze uzwojenia (grzałki antykondensacyjne). Podczas pomiarów kontrolnych wspomniane obwody nie podlegały sprawdzeniu. Wymóg taki producent nakłada na użytkownika w dokumentach DTR – Ogólne wymagania techniczne. Punkt 1. (str. 103) brzmi: *Przed pierwszym uruchomieniem silnika oraz po dłuższym postoju należy sprawdzić stan izolacji uzwojeń silnika (oraz czujników temperatury i grzałek, jeśli są zainstalowane)*. Należy podkreślić jeśli są zainstalowane, nie muszą być używane (np. podłączone do źródła zasilania) ale jeśli są w maszynie muszą podlegać kontroli. Przedmiotowy silnik został w takie grzałki wy-

posażony oraz w czujniki temperatury. Wymagania te zostały zamieszczone przez producenta silnika zgodnie z obowiązującą normą: PN-EN ICE 60034-24-4.

W swojej opinii biegły wyjaśnia, że silnik został naprawiony bez opisu uszkodzenia. Nie zostało zlokalizowane miejsce wystąpienia zwarcia, zatem nie można określić bezpośredniej przyczyny uszkodzenia uzwojenia. Przed załączeniem silnika nie zmierzono rezystancji izolacji. Biegły przyjął hipotezę, że przyczyną awarii było zwarcie w uzwojeniu spowodowane prawdopodobnie zawilgoconiem izolacji. Zawilgocona izolacja w silniku zimnym ma rezystancję umożliwiającą załączenie i pracę silnika. Potwierdza to współczynnik k_{40} – rys.1. Na przykład silnik po dłuższym postoju miał temperaturę otoczenia $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$, zmierzona rezystancja izolacji uzwojenia $R_{60}^{20} = 18 \text{ k}\Omega$, Rezystancja ta przeliczona na temperaturę 40°C wynosi

$$R_{60}^{40} = R_{60}^{20} k_{40}^{20} = 18 \cdot 0,25 = 4,5 \text{ k}\Omega$$

z rys. 1 współczynnik $k_{40}^{20} = 0,25$.

Rezystancja R_{60}^{40} podzielona przez napięcie znamionowe $U_N = 6000 \text{ V}$ wynosi

$$\frac{R_{60}^{40}}{U_N} = \frac{4,5}{6} = 0,75 \text{ M}\Omega/\text{V}$$

Jeśli silnik z taką rezystancją izolacji załączyć do sieci, to w temperaturze $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ silnik pracuje, lecz z upływem czasu uzwojenie grzeje się, temperatura izolacji rośnie, gdy uzwojenie osiąga temperaturę np. 40°C , rezystancja izolacji uzwojenia zmniejsza się do $4,5 \text{ k}\Omega$ i natężenie pola elektrycznego powoduje przebicie izolacji. W stosunkowo krótkim okresie czasu pracy silnika, w przypadku podmiotowego silnika około 1 godz., spadek rezystancji jest tak duży, że wystąpiło przebicie izolacji do masy i między fazami. Sam przebieg awarii jest mniej istotny. Faktem jest, że silnik nie powinien być dopuszczony do ruchu bez pomiarów parametrów izolacji i bez oceny spełnienia warunków podanych w DTR - tabela 2. Wyniki negatywne poprawnie wykonanych pomiarów parametrów izolacji R_{60} i $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ są wskaźnikami, że silnik należy suszyć, nie wolno go załączać do pracy.

Literatura

- [1]. Drak B., Glinka t., Kapinos J., Miksiewicz R., Zientek P.: Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce. ISBN 978-83-931909-4-2. Wydawnictwo BOBRME Komel. 2013.

- [2]. Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. ISBN 978-83-910585-4-9. Wydawnictwo BOBRME Komel. 2002.
- [3]. Golubev A., Paoletti G.: Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment. 2000 IEEE Reprinted, with permission, from Paper 99-25 presented at the IAS 34th Annual Meeting. Oct. 3-7, 99 Phoenix, AZ.
- [4]. Instrukcja instalacji, obsługi i konserwacji silników elektrycznych. WEG. www.weg.net
- [5]. Plutecki Z.: Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Studia i monografie. Z. 325. Politechnika Opolska. ISSN 1429-6063. ISBN 978-83-62736-78-8. Oficyna wydawnicza Politechnika Opolska. 2012
- [6]. Polak A.: Opinie Biegłego opracowane dla Sądu.
- [7]. Trójfazowe silniki klatkowe wysokiego napięcia serii Sh 355-560 o wysokiej sprawności. Cantoni Grup. Emit. Karta katalogowa.