

Agnieszka Jakubowska-Ciszek, Politechnika Śląska, Gliwice
Piotr Wąs, Ośrodek Pomiarów i Automatyki PW S.A., Zabrze

URZĄDZENIE DO MONITOROWANIA KOMUTATORA I PIERŚCIENI ŚLIZGOWYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

COMMUTATOR AND ELECTRICAL MACHINES SLIP RINGS MONITORING DEVICE

Streszczenie: Nieodłącznym elementem elektrycznych silników dużej mocy są komutatory i pierścienie. W przypadku wirujących maszyn elektrycznych siła odśrodkowa wirującej masy wirnika po pewnym czasie doprowadza do uszkodzenia komutatora lub pierścieni. Takie uszkodzenia należą do największych zagrożeń, powodujących długotrwały przestój. Wśród przyczyn nagłych i niespodziewanych ich awarii są nieskuteczne działania diagnostyczne. Dobór właściwej metody diagnostycznej umożliwia zapobieżenie ciężkiej awarii. Prezentowana metoda diagnostyczna wykrywa postępujące uszkodzenie już na początkowym etapie jego rozwoju. Dzięki temu można zapobiec ciężkim awariom i długim przestojom na remoncie. Opracowanie dokładnej głowicy pomiarowej do prac w ruchu pozwoliło na określenie temperatury i geometrii komutatora lub pierścienia. Metody pomiarów na postoju nie pozwalają stwierdzić czy geometria i temperatura komutatora pod wpływem siły odśrodkowej nie ulegnie niebezpiecznej zmianie. Wady tej nie ma proponowana metoda diagnostyczna.

Abstract: Commutators and rings are inseparable elements of high-power electric motors. In case of rotating electric machines, the centrifugal force of the rotor rotating mass causes damage to the commutator or rings after some time. Such damage is one of the biggest threats that causes long-term outage. Ineffective diagnostic activities are among the sudden and unexpected causes of their failure. Selecting an appropriate diagnostic method is a way to prevent a serious accident. The paper presents a diagnostic method, which detects the progressive damage right at the initial stage of its development. Consequently, it is possible to prevent serious failures and long outage for repairs. The development of an accurate measuring head for work in motion has allowed to determine the temperature and geometry of the commutator or ring. The measurement methods performed at a outage do not allow to determine whether the commutator geometry and temperature under the influence of centrifugal force will change dangerously or not. The proposed diagnostic method avoids this problem.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, bezdotykowe badania diagnostyczne, komutator, pierścienie*
Keywords: *electrical machines, non-contact diagnostic tests, commutator, slip ring*

1. Wstęp

Niezawodność i długi okres eksploatacji dużych maszyn elektrycznych wiąże się z ich przeglądami, skuteczną diagnostyką i usuwaniem usterek mogących prowadzić do ciężkich awarii, co za tym idzie zapobieganiu ponoszenia związanych z nimi stratami finansowymi oraz zagrożeniem bezpieczeństwa ludzi i mienia. Skuteczne prowadzenie nadzoru i monitorowanie stanu wrażliwych elementów maszyny elektrycznej, jakimi są komutator albo pierścienie ślizgowe prowadzi do szybkiego reagowania i unikaniu ciężkich awarii. Cennym atutem metod diagnostycznych jest, gdy pozwalają one na pomiary bezdotykowo i w ruchu.

2. Cel projektu

Celem projektu jest uzyskanie użytecznych danych pomiarowych, świadczących o bieżącym stanie maszyny elektrycznej z komutatorem albo pierścieniami ślizgowymi. Zakres zastosowań dotyczy pomiarów maszyn będących w ruchu, w stanach normalnej pracy, tzn. przy pełnym zakresie prędkości obrotowej i prądów obciążenia. Związane jest to z coraz bardziej rosnącymi wymaganiami klientów odnośnie obniżania kosztów pomiarów, czasu ich trwania i wymogów odnośnie dokładności. Dlatego żądają oni coraz częściej, aby pomiary zostały przeprowadzone przez systemy pomiarowe, a nie ludzi. Pomiary przeprowadzane przez ludzi trwają wiele godzin a nawet dni, tylko na postoju a często przy częściowym lub całkowitym demontażu maszyny.

3. Metoda pomiarowa

Doświadczenie wyniesione z wieloletniej eksploatacji maszyn elektrycznych wykazuje potrzebę opracowania takiej metody pomiarowej, która pozwala przeprowadzanie pomiarów w czasie występowania znamionowej siły odśrodkowej i drgań przy działaniu dynamicznym prądu oraz pod wpływem temperatury wywołanej jego przepływem. Pomiar przeprowadzone w ruchu pozwalają na wielopunktowy pomiar w bardzo krótkim czasie, na całym obwodzie kilkakrotnie. Pomiar przeprowadzone na postoju maszyny nie pozwalają na taki zakres diagnostyki jak pomiary uzyskane na wirującej maszynie. Ustalenie rzeczywistej przyczyny w nieprawidłowo działającej maszynie trwa na ogół krócej, gdy badania przeprowadza się dynamicznie a nie statycznie, lecz z odpowiednio wysoką dokładnością. Obecnie oferowane technologie pozwalają coraz częściej sprostać tym wysokim wymaganiom. Proponowana metoda została praktycznie zrealizowana i wdrożona przez OPA PW S.A. w Zabrze. Pierwszy egzemplarz został zbudowany i pomysłnie przetestowany, a zdobywane doświadczenie pozwoli w przyszłości na dalsze jego ulepszenie.

4. Technika pomiarowa

Wspomniana metoda diagnostyczna polega na przeprowadzeniu rejestracji zmian geometrii i temperatury komutatora albo pierścieni ślizgowych w czasie ruchu maszyny. Jest ona zasadniczo prosta i opiera się na klasycznych zasadach fizyki, lecz jej realizacja wymaga zastosowania zaawansowanych nowoczesnych technik i technologii pomiarowych. Czas na przeprowadzenie jednego pomiaru jest tym krótszy im większa jest prędkość liniowa przemieszczającej się obwiedni komutatora albo pierścienia. Założenie to nie zawsze jest do spełnienia, szczególnie w przypadku pomiaru temperatury.

Zastosowana technika pozwala uzyskać optymalny zakres i rozdzielczość mierzonych zmian geometrii i temperatury w wąskim polu pomiarowym. Dzięki technice bezdotykowej zachowane jest również pełne bezpieczeństwo maszyny i ludzi oraz nie uszkadza się badanej powierzchni, a tak często się dzieje gdy stosuje się mikrometr czy czujnik z końcówką szafirową.



Rys. 1. Głowica dotykowa z końcówką szafirową

Problem powtarzających się lub nieprzewidywanych postojów spowodowanych awariami zostanie ograniczony. Wczesne wykrywanie przyczyn zapobiega groźnym skutkom. Postępująca nieuchronnie destrukcja nie wymknie się szybko spod kontroli.

5. Korzyści płynące z metody

Dzięki proponowanej metodzie pomiarowej i wykorzystaniu przedstawionej techniki uzyskuje się doświadczenie i umiejętność przewidywania skutków pracy danej maszyny elektrycznej w określonym pomiarze stanie.

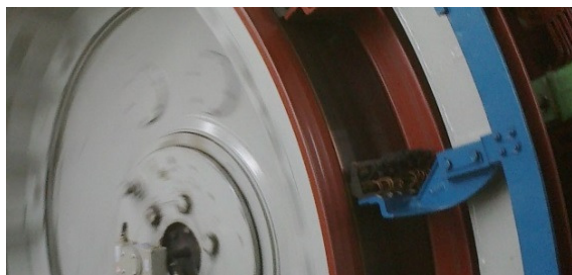
6. Formalizacja problemu

Zdanie sobie sprawy z powagi problemu, na czym polega innowacyjność rozwiązania i jakie płyną korzyści z jego wykorzystania wynika z określonego prawa fizyki. Siła odśrodkowa, która jest nieodłącznym elementem każdej wirującej maszyny elektrycznej jest tym większa im większa jest masa wirująca, jej średnica i kwadrat prędkości obrotowej.

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (1)$$

gdzie: F – siła odśrodkowa, ω – prędkość kątowa wirowania, r – promień

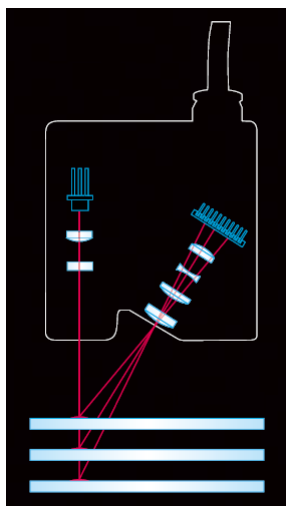
Problem jest tym większy, im większa (cięższa) jest masa wirująca, im większa jest prędkość wirowania oraz im większa jest średnica części wirującej. Korzystając z tej metody można przewidzieć i zapobiec ciężkim i długotrwałym awariom, a przez to postojom, ważnych dla całego procesu technologicznego maszyn wirujących. Podnosi się również poziom bezpieczeństwa i niezawodności. Ma to niebagatelne znaczenie dla obiektów, takich jak maszyny wyciągowe, główne odwadnianie i wentylacja w podziemnych zakładach górniczych, czyli kopalniach. Również w hutach i rafineriach znajduje zastosowanie proponowana metoda.



Rys. 2. Przykład komutatora w czasie pracy

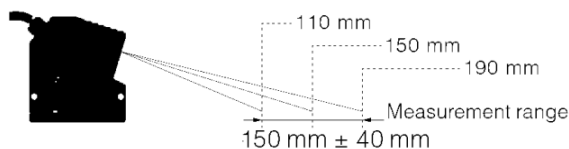
7. Wyposażenie

Stanowisko pomiarowe MKPS składa się z jednej z trzech głowic pomiarowych, uchwytów, statywów itp. osprzętu do pozycjonowania głowicy w osi prostopadłej do osi wirowania maszyny, przewodów, kontrolerów i komputera przenośnego, czyli laptopa. Proponowana technika pomiarów zmusza do zastosowania ultraszybkich i wysokowydajnych laserowych sensorów drogi. Wybrano sensor serii LK-G500 japońskiej firmy [3] jak na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Zasada triangulacji [3]

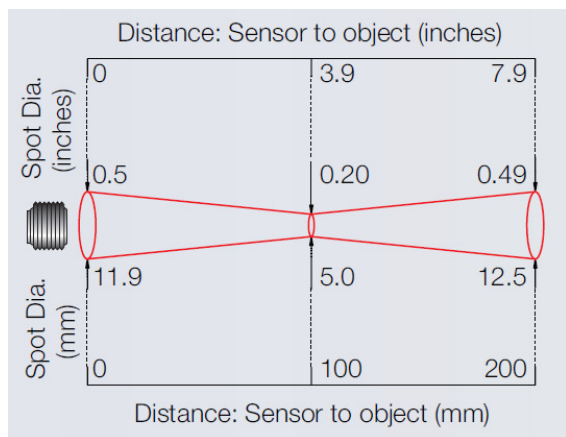
Pozwala on śledzić obiekty o szorstkiej powierzchni, małych gabarytach, o powierzchniach przezroczystych lub lustrzanych, zdolne do reakcji w każdej sytuacji dzięki niezawodności i sprawności funkcjonowania. Posiada ona najwyższą powtarzalność w swojej klasie $0,005 \mu\text{m}$, najwyższą dokładność w swojej klasie $\pm 0,02\%$, najszybszą w świecie częstotliwość próbkowania 392 kHz . Spośród proponowanych głowic wybrano głowicę LK-H152 o odstępnie 150 mm od badanego obiektu i zakresie $\pm 40 \text{ mm}$, dokładności powtarzalnej $0,25 \mu\text{m}$, o średnicy plamki pomiarowej $\phi 120 \mu\text{m}$.



Rys. 4. Zakres pomiaru LK-H152 [3]

Oznacza to, że modele te wyposażono w najnowsze technologie. Dzięki ultraszybkiej częstotliwości próbkowania dadzą się zarejestrować obiekty poruszające się bardzo szybko, lub gwałtownie się zmieniające z ekstremalną precyzją i stabilnością. Technologie, które dotąd były nieosiągalne uzyskuje się dzięki matrycy RS-CMOS R – wysoka rozdzielczość S – wysoka prędkość. Podwojenie zakresu pikseli struktury CMOS umożliwia wysoką precyzję. Optyka została przerobiona nie tylko w celu powiększenia szerokości punktu świetlnego, lecz również, aby zarejestrować najmniejsze wyniesienie mierzonego elementu. Geometria punktu laserowego w kombinacji z udoskonaloną matrycą CMOS umożliwia uzyskanie dotąd nieosiągalnych dokładności. Zastosowano system ABLEII [3] do nastawiania intensywności światła, rozdzielczości, czasu trwania światła. Specjalnie do tego celu zaprojektowano obiektyw z linearną soczewką kolimatora. Punkt lasera jest celowo ogniskowany i unika się nieregularności. Równomierna wielkość punktu świetlnego jest decydującą zaletą przy pomiarach małych obiektów. Bardzo równomierny owalny promień światła formuje soczewka cylindryczna, co ma wielkie znaczenie dla pomiarów obiektów o szorstkiej powierzchni. Ponadto zadbano o równomierną szerokość promienia światła w całym zakresie. Efekty wykrzywienia zostały zminimalizowane technologią Delta-Cut [3] poprzez symetryczne przyporządkowanie elementów CMOS, obiektyw i filtr. Pozycja obiektu pomiarowego zostaje ustalona (zmierzona) przy wykorzystaniu metody triangulacji rys. 3. Odbity promień światła trafia na matrycę RS-CMOS. Piksele na które padł promień odbitego światła pozwalają ustalić pozycję obiektu pomiarowego. Głowica LK-H152 współpracuje z kontrolerem LK-G5001P [3]. Przyłącze rozszerzające kontrolera pozwala na podłączenie do 10 głowic pomiarowych, za pomocą których można prowadzić jednocześnie rejestrację. Posiada interface RS-232C 9600 do 115200 bps, USB 2.0 dla wysokich prędkości i Ethernet 100 Base-TX/10 Base. Zasilanie $24 \text{ VDC} \pm 10\%$ $3,5 \text{ A}$ przy wykorzystaniu maksymalnej liczby głowic

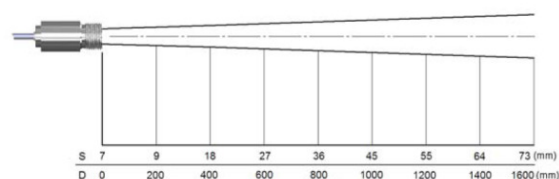
i rozszerzeń. Wyprowadzenie alarmowe, komparatorowe, binarne typu PNP otwarty kolektor. Powstaje jednak pytanie o granice takiego rozwiązania. Ograniczeniem są w tym przypadku drgania całego obiektu, które mogą się w pewnym niewielkim stopniu jednak przenosić na głowicę pomiarową. Analizując wyniki rejestracji należy to uwzględnić i jeżeli jest to możliwe eliminować. Układ pomiarowy pracuje bezdotykowo względem badanej maszyny, co oznacza, że rejestracja może być prowadzona przez nawet długi czas, wybranych momentach. Do bezdotykowego pomiaru temperatury wybrano dwa przetworniki pomiarowe. Powodem jest podział zakresu temperatur na przedziały poniżej i powyżej 50°C. Typowy komutator pracuje dobrze w temperaturze do 70°C. Bezdotykowy sensor na podczerwień 8 do 14 μm PyroEpsilonPE-CF-MT mierzy temperaturę od 0°C do 250°C. Pola obrazu o średnicy 5 mm. Niepewność pomiaru $\pm 1\%$ wartości mierzonej lub $\pm 1^\circ\text{C}$, dokładność powtarzalna $\pm 0,5^\circ\text{C}$ wartości mierzonej, współczynnik emisyjności 0,2 do 1,0, czas reakcji 240 ms. Wyposażony jest w jedno wejście i jedno wyjście analogowe 4 do 20 mA. Napięcie zasilania 24 VDC. IP65. Temperatura otoczenia sensora 0°C do 70°C.



Rys. 5. Pole pomiaru PyroEpsilon [4]

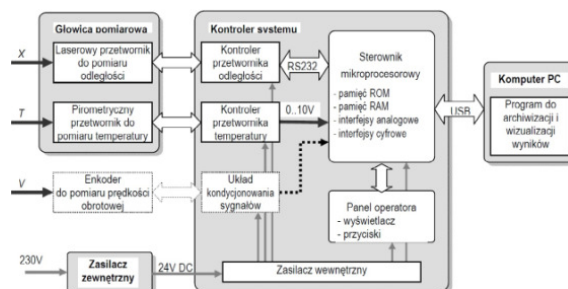
Drugi przetwornik pirometryczny do bezdotykowego pomiaru temperatury to microEpsilon CTM-3SF22-C3 o większej precyzji, przeznaczony do pomiarów temperatury metali i materiałów kompozytowych. Zminiaturyzowany sensor, mniejsza głowica niż PyroEpsilon mierzy na długości fali 2,3 μm od 50°C do aż 1800°C. Temperatura baz schładzania sensora 85°C. Znosi przeciążenia 3G, a udary 55G. Rozszerzona kompensacja błędów pomiarowych. Sensor posiada wysoką odporność na wpływy pola elektromagnetycznego, co ma znaczenie przy

miarach w sąsiedztwie komutatora i dużych prądach. Najmniejsza plamka optyczna (ostry punkt) to 6,5 mm, rozdzielczość optyczna 22:1, czas rejestracji jednego pomiaru to 1 ms, stopień emisyjności od 0,100 do 1,100. Dokładność $\pm(0,3\% T_{\text{mes}} + 2^\circ\text{C})$, powtarzalność $\pm(0,1\% T_{\text{mes}} + 1^\circ\text{C})$. Interface 4 do 20 mA jedno wejście (współczynnik emisyjności), jedno wyjście. Napięcie zasilania 24 VDC. Średnica sensora 18 mm, długość 103 mm. Ciężar 95 g. IP65. Wymagane jest jednopunktowe skalowanie temperatury.



Rys. 6. Pole pomiaru microEpsilon [4]

Kontroler wraz z oprogramowaniem do obsługi sensorów pirometrycznych zbudowany jest na mikrokontrolerze ATMEGA128 wg własnego opracowania.



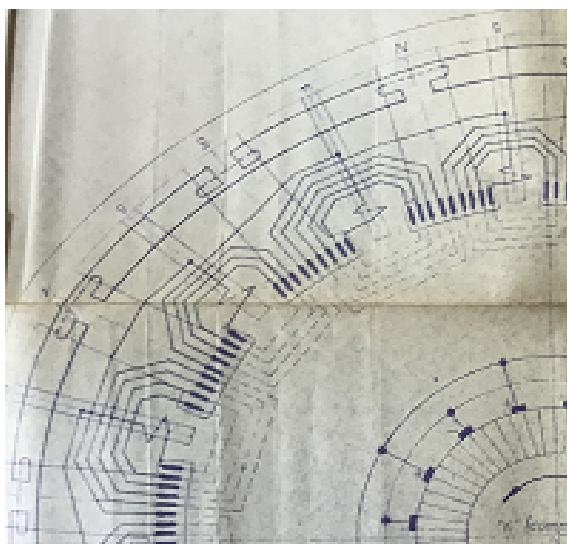
Rys. 7. Kompletny układ pomiarowy

Ograniczenia zastosowania metody pirometrycznej biorą się z braku informacji o rzeczywistym współczynniku emisyjności badanego materiału. Jednak nie ma to większego znaczenia dla pomiarów porównawczych. Jeżeli temperatura sąsiednich działek komutatora będzie się znacząco różnić, to również jest to informacja o stanie odbiegającym od normalnego. Ponawiając pomiary temperatury, co pewien okres czasu można stwierdzić, czy stan tego obwodu podłączonego do tej konkretnej działki komutatora ulega zmianie, lub jest stabilny. Wydaje się, że szybkie wykrycie uszkodzonej działki komutatora możliwe jest przy rejestracji temperatury maszyny od wychłodzonej do nagrzanej. Temperatura uszkodzonej działki podniesie się znacznie szybciej niż nieuszkodzonych. Informacja zawarta w promieniowaniu podczerwonym jest bardzo

cenna, ponieważ wydzielona energia cieplna zależy od kwadratu natężenia prądu obserwowanego obwodu. Przerwa, lub zwarcie między zwojowe (tzw. skrót uzwojenia) zmieni jego wartość i przez to zmieni się temperatura. Również pęknięcie lub obluźnienie się w obwodzie uzwojenia jednej działki pod wpływem siły odśrodkowej, drgań ujawni się już w początkowej fazie uszkodzenia w czasie ruchu maszyny. Przy zatrzymanej maszynie stan taki jest do wykrycia dopiero przy postępującym większym uszkodzeniu. Niemniej wynika to tylko z pewnych rozważań, a potwierdzić to może jedynie praktyka, czemu ma służyć proponowana metoda oraz technika pomiarowa.

8. Procedura pomiaru owalności

Dla przykładu rozpatrzony zostanie komutator wyciągowego silnika prądu stałego produkcji DoIMel Wrocław, typ PW-104, o mocy 2000 kW, $n = 51$ obr./min.



Rys. 8. Fragment silnika PW-104

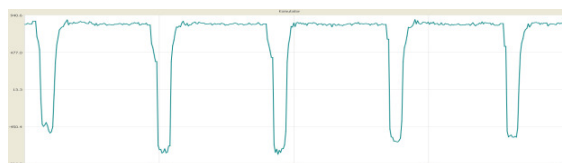
Średnica koła pędnego 5000mm, obwód koła pędnego 15710 mm. Przy maksymalnej prędkości w szybie 10,5 m/s przyjęto prędkość obrotową 40,2 obr./s, czyli 0,67 obr/s. Średnica komutatora $D = 2500$ mm, czyli obwód wynosi 7854 mm.

Prędkość liniowa komutatora wynosi:

$$V = 7854 \cdot 0,67 = 5262 \text{ mm/s} = 5,262 \text{ m/s} = 526,2 \text{ } \mu\text{m}/100 \text{ } \mu\text{s}$$

Liczba działek komutatora 1536 sztuk, co daje $7854/1536 = 5,1$ mm/1szt (wraz z przerwą izolacyjną). Plamka pomiarowa obejmuje obszar o średnicy 120 μm . Ze względu na potrzebę zeskanowania całego obwodu komutatora, przyjęto czas pomiaru jednego punktu w przeciągu

100 μs , czyli 526,2 μm /próbkę i $5,1/0,53 \approx 9,6$ próbek/1działkę. Maksymalnie można zarejestrować do 20 000 pomiarów, czyli przez 2 s co daje: $20\,000 \cdot 526,2 \cdot 10^{-6} / 7,854 \approx 1,34$ obrotu. W celu rejestracji z największą dostępną gęstością (rozdzielczością) pomiaru, czas pomiaru można skrócić do 5 μs , co pozwoli dokonać pomiaru co 26,3 μm , na 6,7% obwodu. Dzięki temu można również ocenić porowatość pomierzonego fragmentu komutatora. Parametry graniczne głowicy są na tyle duże, że możliwe są pomiary komutatorów wirujących nawet z prędkością 750 obr./min, (np. w prądnicach sterujących układu Leonarda, taka jak DoIMel P-1500 $\phi_{\text{komutatora}} = 800$, 2×225 działek komutatora), napędzanych silnikiem synchronicznym. Głowica LK-H152 bardzo dobrze spełnia te wymagania. Po tych przeliczeniach należy zamocować głowicę LK-G152 w odległości 150 mm od płaszczyzny komutatora. Zakres pomiarowy zawarty jest w przedziale ± 40 mm, czyli możliwe jest jej oddalenie o prawie 190 mm. Następnie można przeprowadzić rejestrację.



Rys. 9. Przykład rejestracji



Rys. 10. Powiększenie jednej działki

Rejestrację przeprowadzamy dla kilku reprezentatywnych ścieżek na całej szerokości komutatora. Powód wyraźnie widać na rys. 11.



Rys. 11. Nierównomierne zużycie się powierzchni komutatora

9. Podsumowanie

Opracowany zestaw aparatury pomiarowej wprowadza użytkowników wirujących maszyn elektrycznych w nową jakość pomiarów, która jest niedostępna bez metod bezdotykowych. Precyzja, szybkość, obniżanie kosztów, jakie daje jej zastosowanie, prowadzi do jej coraz szerszego wykorzystania, głębszej analizy zgromadzonych wyników, a nawet prac badawczych z zakresu niezawodności.

10. Literatura

- [1]. Plamitzer A.M., Maszyny elektryczne WNT 1986.
- [2]. Szklarski L., Zarudzki J., Elektryczne maszyny wyciągowe, PWN, 1998.
- [3]. Karty katalogowe firmy KeyenceModellreihe Lk-G5000.
- [4]. Karty katalogowe firmy Calex Electronics Limited głowic pirometrycznych microEpsilon i pyro-Epsilon.
- [5]. Praca zbiorowa, Poradnik Inżyniera Elektryka tom 2 WNT1995,1997.
- [6]. Dr inż. Henryk Urzędniczok, Numer pracy w Politechnice Śląskiej 05/020/NB_16/0018 pn (NB-248/RE2/2016).