

Pomiary wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych przy użyciu czujników antenowych

Sławomir Szymaniec

Układy izolacyjne silników WN (wysokiego napięcia) pracują w warunkach wieloczynnikowego narażenia, co powoduje, że w czasie eksploatacji powiększają się defekty już istniejące oraz powstają nowe. Procesowi starzenia się izolacji towarzyszy zjawisko wyładowań niezupełnych – (wnz), (*PD Partial Discharge*). Wyładowania niezupełne występujące wewnątrz układu izolacyjnego tylko częściowo zwierają izolację między przewodnikami, które mogą być przyległe lub nie do przewodnika [7]. Prowadząc regularne pomiary wnz w trybie *on-line*, uzyskuje się możliwość wyznaczenia zmian poziomu wnz w czasie. Gwałtowne, trwałe zmiany poziomu wnz mogą wskazać na pojawiające się nowe uszkodzenie izolacji lub zintensyfikowanie się uszkodzenia istniejącego. W trybie *on-line* poszczególne pomiary wnz nie zawsze uzyskiwane są w takich samych warunkach pomiarowych, ponieważ parametry pracy maszyn zmieniają się w czasie eksploatacji. Coraz częściej stosowana w Kanadzie i USA metoda porównywania pomiarów wnz w trybie *on-line* z bazą danych producentów maszyn lub producentów urządzeń, zawierającą tysiące wyników pomiarowych, przynosi szereg cennych i oczekiwanych przez służby techniczne informacji diagnostycznych. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych metodą wnz w trybie *on-line* nie są pozbawione pewnych ograniczeń. Do najistotniejszych należy zaliczyć wpływ zakłóceń. Oceniając pomiary wykonywane w warunkach przemysłowych, trzeba odróżnić wnz występujące w badanej maszynie od zakłóceń. Problem zakłóceń po części rozwiązują same przyrządy pomiarowe, które wykonują pomiary w układzie różnicowym (przyrząd PDA). PDA dokonuje porównania różnicowego impulsów wnz. W oparciu o różnicę w czasie przejścia impulsów do PDA przeprowadzana jest klasyfikacja na impulsy wnz pochodzące z izolacji uzwojenia oraz impulsy pochodzące od zakłóceń. Do pomiarów wnz w maszynach elektrycznych, mających na celu ocenę stanu izolacji uzwojeń, można stosować m.in. czujniki typu termorezystory – RTD (*Resistance Temperature Detector*) oraz czujniki paskowe SSC (*Stator Slot Couplers*) używane jako anteny [1, 2]. Dobór anten do pomiarów wnz w silnikach, zdaniem autora, powinien być poprzedzony wyborem zakresu pomiaru wnz ze względu na wpływ zakłóceń przemysłowych. Należy ustalić zakres częstotliwości sygnału wnz, w którym jest najkorzystniejszy stosunek sygnału do zakłóceń. Długoletnie badania przemysłowe w tym zakresie prowadziła firma ADWEL. Ustalono, że najkorzystniejszy jest zakres 1–150 MHz (PDA PREMIUM) [1]. Na rys. 1 przedstawiono w uproszczonej graficznej formie rezultaty badań. Firma VIBROCENTER, prowadząc podobne badania w późniejszym okresie, ustaliła, że najkorzystniejszy jest zakres 1–20 MHz. Autor w swoich badaniach przyjął do pomiarów wnz silników zakres 1–20 MHz.

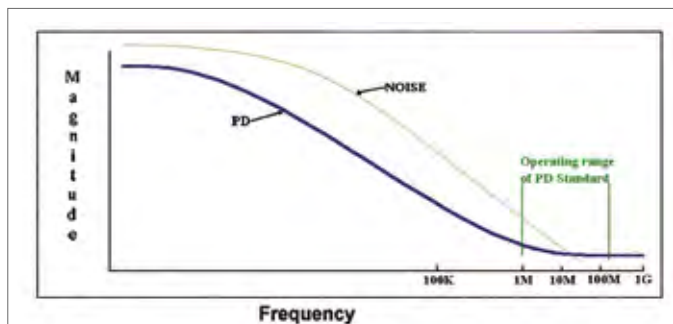
Streszczenie: W artykule przedstawiono doświadczenia autora w stosowaniu czujników antenowych do pomiarów wyładowań niezupełnych (wnz) w izolacji maszyn elektrycznych. Pomiary te miały na celu ocenę stanu izolacji uzwojeń *off-line* i *on-line*. Autor przedstawił wyniki badań własnych, w szczególności omawiając anteny na bazie termorezystorów RTD, anteny paskowe, pętlicowe i przenośne. Autor wykazał bardzo dużą użyteczność w pomiarach wnz silników układów antenowych typu termorezystory RTD wraz z zespołami antenowymi. Pomiary wnz, przez poszczególne termorezystory umieszczone w silniku, dają możliwość lokalizowania miejsc generowania wnz, czyli miejsc osłabienia izolacji uzwojeń. Czujniki antenowe są bardzo przydatne do pomiarów wnz i diagnostyki stanu izolacji uzwojeń *on-line*. Proponowane przez autora własne rozwiązania czujników do pomiarów wnz w maszynach elektrycznych w warunkach przemysłowych sprawdziły się.

MEASUREMENTS OF PARTIAL DISCHARGES IN ELECTRIC MOTORS USING ANTENNA DETECTORS

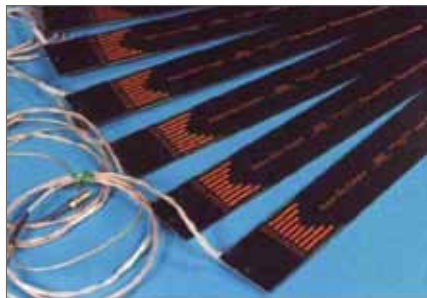
Abstract: *The article presents experience of the author in use of antenna detectors for measurements of partial discharges in electric motors. The measurements aim at off-line and on-line evaluation of the condition of winding insulations. The author presents results of his own research, in particular discussing antennas based on RTDs, strip, loop and mobile antennas. The author demonstrates high usefulness of RTD-type antenna systems together with antenna assemblies in measurements of partial discharges in motors. Measurements of partial discharges by individual RTDs situated in motors enable to locate the place of partial discharge generation, i.e. the place where winding insulations are weakened. Antenna detectors are very useful to measurements of partial discharges and on-line diagnostics of the condition of winding insulations. The author's solutions regarding detectors for measurements of partial discharges in electric machines in industrial conditions have proved to be successful.*

Zdaniem autora spośród możliwych do zastosowania anten w pomiarach wnz maszyn elektrycznych wymienić należy trzy rodzaje:

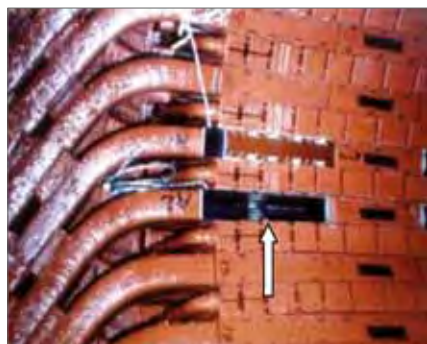
- anteny paskowe, SSC;
- anteny wykorzystujące termorezystory RTD;
- anteny pętlowe.



Rys. 1. Widmo wnz (PD) maszyn elektrycznych w czasie ich eksploatacji oraz widmo zakłóceń wg firmy ADWEL [1]



Rys. 2. Anteny paskowe firmy Iris przygotowane do montażu



Rys. 3. Antena paskowa umieszczona w żłobkach, widok ogólny

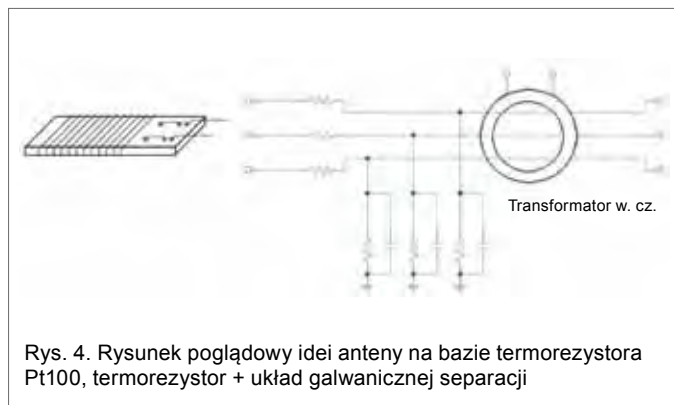
Anteny paskowe

Anteny paskowe skonstruowano specjalnie jako czujniki do badań diagnostycznych stanu izolacji w oparciu o pomiary wnz dla dużych generatorów. Anteny te opracowano w latach 80. XX wieku w kanadyjskiej firmie Iris [7]. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe rozwiązania anten paskowych wspomnianej firmy. Wykonane są na bazie szkła epoksydowego. Zastosowanie tego materiału powoduje, że antena posiada bardzo dobre parametry dielektryczne i mechaniczne. Antena dzięki epoksydowemu podłożu dielektrycznemu jest w stanie pracować nawet przy bardzo wysokich temperaturach rzędu 150°C.

Podstawowe parametry anten firmy Iris:

- pasmo 10–100 MHz;
- grubości 2 mm;
- długość do 53 cm.

Istnieje możliwość dopasowania szerokości anteny do rozmiarów żłobka. Antena mierzy wnz zarówno przy wyjściu uzwojenia ze żłobka, jak i z wnętrza żłobka. Czujniki SSC instalowane są w generatorach i silnikach w żłobkach pod klinami – rys. 3. Zazwyczaj do pełnego monitoringu wystarcza komplet sześciu anten, jednak dla większych generatorów liczba czujników wzrasta. Antena ma bardzo dobrą czułość, ponadto jest odporna na wszelkiego rodzaju zakłócenia zewnętrzne i wewnętrzne, wszystkie impulsy o czasie trwania dłuższym niż 6 ns są traktowane jak zakłócenia [7].



Rys. 4. Rysunek poglądowy idei anteny na bazie termorezystora Pt100, termorezystor + układ galwanicznej separacji



Rys. 5. Rysunek poglądowy idei anteny na bazie termorezystora Pt100, układ dostrojenia anteny

Anteny wykorzystujące termorezystory RTD i anteny pętlowe

Anteny do pomiarów wnz w silnikach wykorzystujące czujniki temperatury typu termorezystory Pt100 oraz anteny pętlowe autor opracował we własnym zakresie [8]. Termorezystory Pt100 są powszechnie stosowane w silnikach elektrycznych do pomiaru temperatury uzwojeń stojana. Montuje się je fabrycznie w danym żłobku, w miejsce wyciętej przekładki międzywarstwowej uzwojenia. Autor na drodze eksperymentalnej opracował antenę, której części składowe przedstawiono na rys. 4. Antena to otwarty obwód drgający LC. Obwód staje się „otwarty”, to znaczy przekształca się w antenę, gdy jego długość stanowi istotną część długości fali, na którą obwód został nastrojony. Jakość anteny, jako elementu odbierającego, jest tym wyższa, im długość jej jest bardziej zbliżona do ¼ lub ½ długości fali. Antena zaczyna wydajnie pracować, jeżeli jej długość przekracza 1/10 długości fali [6]. Długość anteny musi być odpowiednią wielokrotnością długości fali λ :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

gdzie:

- λ – długość fali [m];
- C – prędkość światła (3×10^8 m/s);
- f – częstotliwość [Hz].

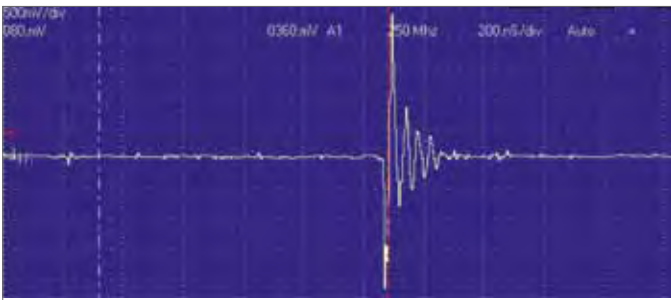
Zależność między pojemnością, indukcyjnością a częstotliwością w obwodzie rezonansowym można wyrazić wzorem:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$$

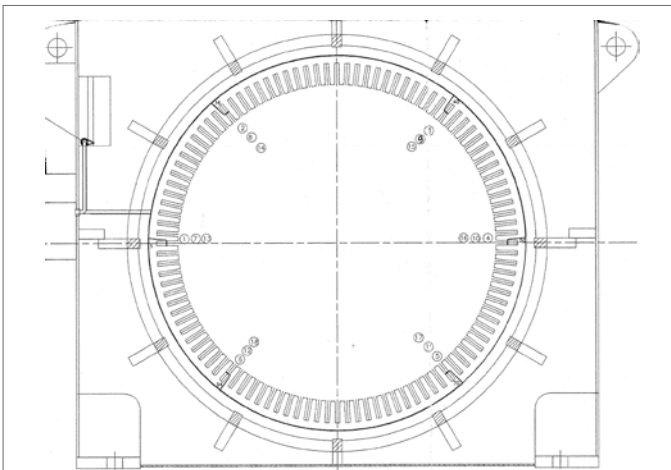
gdzie:

- f – częstotliwość [Hz];
- L – indukcyjność układu antenowego [H];
- C – pojemność układu antenowego [F].

W układach antenowych zastosowanych w silnikach autor starał się ustawić częstotliwość rezonansową anten na 10 MHz,



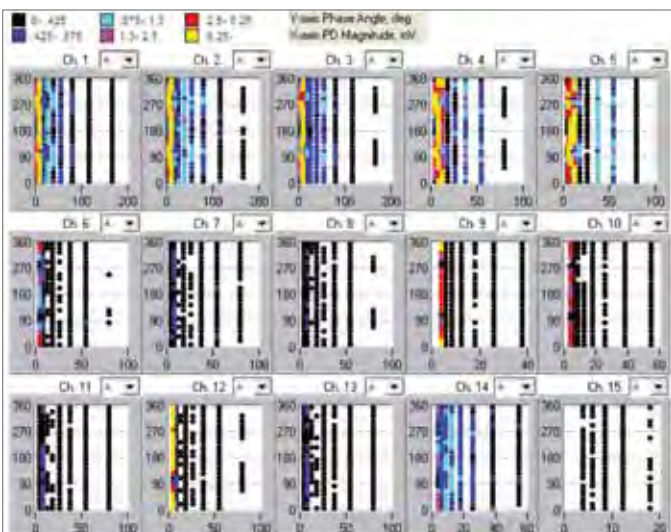
Rys. 6. Przykładowy oscylogram napięcia z anteny na bazie czujnika Pt100 w czasie pomiarów wnz jednego z silników przemysłowych



Rys. 7. Rozmieszczenie czujników PT100 w żłobkach stojana badanego silnika



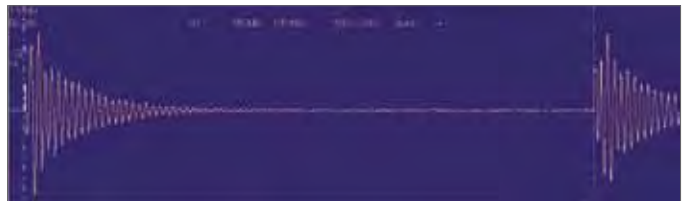
Rys. 8. Widok badanego stojana silnika oraz stanowisko pomiarowe w czasie kalibracji torów pomiarowych



Rys. 9. Przykładowe wyniki pomiarów wnz silnika o mocy 2,6 MW, tzw. wykresy fazowo-rozdzielcze



Rys. 10. Wnętrze stojana z fragmentem anteny pętlowej



Rys. 11. Przykładowy oscylogram napięcia z anteny pętlowej w czasie pomiarów wnz jednego z silników przemysłowych



Rys. 12. Antena paskowa własnej konstrukcji do pomiarów wnz silników



Rys. 13. Prototypowa antena paskowa własnej konstrukcji w czasie pomiarów off-line wnz stojana



Rys. 14. Sonda do pomiarów wnz własnej konstrukcji w oparciu o antenę paskową



Rys. 15. Pomiary wzn *off-line* na stojanie prototypową sondą wykorzystującą antenę przenośną

wykorzystując do tego indukcyjności i pojemności: Pt100, przewodów dołączonych do termorezystorów oraz pojemności i indukcyjności umieszczone na płytce drukowanej zespołu antenowego. Starano się również drogą eksperymentalną ustalić pasmo przenoszenia anten na zakres 1–20 MHz [8].

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy oscylogram napięcia z anteny na bazie czujnika Pt100 w czasie pomiarów wzn jednego z silników przemysłowych (rys. 7 i 8).

Na rys. 7 przedstawiono rozmieszczenie czujników Pt100 w żłobkach stojana badanego silnika. Rys. 8 przedstawia widok badanego stojana silnika oraz stanowisko pomiarowe w czasie kalibracji torów pomiarowych.

Na rys. 9 przedstawiono przykład pomiarów wzn silnika o mocy 2,6 MW z wykorzystaniem fabrycznie zamontowanych w silniku termorezystorów Pt100. Instalację aparatury pomiarowej wykonano bez zatrzymywania silnika. W wyniku pomiarów wzn stwierdzono (rys. 9), że izolacja uzwojeń silnika na czołach wymaga gruntownego oczyszczenia. Silnik w dogodnym technologicznie czasie zatrzymano, czoła gruntownie oczyszczono, izolację poddano regeneracji. Kontrolne pomiary wzn silnika po wykonaniu tych zabiegów wykazały kilkukrotne zmniejszenie poziomu wzn.

W kolejnym etapie badań własnych autor zajmował się wykorzystaniem anten pętlowych do pomiarów wzn. Termorezystory Pt100 zastąpiono pętlami przewodu w miarę możliwości technicznych nawiniętymi w silniku wokół czoł uzwojeń, rys. 10. Na rys. 11 przedstawiono przykładowy oscylogram napięcia z anteny pętlowej w czasie pomiarów wzn jednego z silników przemysłowych. Ten rodzaj czujnika jest szczególnie interesujący, bo przy sprzyjających okolicznościach (możliwość nawinięcia wokół czoł pełnej wielokrotnej pętli) ma strefę widzenia wzn pełne 360°. Oznacza to możliwość mierzenia wszystkich wyładowań w strefie czoł. Autor prowadził również badania z antenami paskowymi, w tym własnej konstrukcji. Na rys. 12 przedstawiono przykład takiej anteny, a na rys. 13 ilustrację z badań w warunkach stacji prób. Uzyskane pozytywne rezultaty badań stały się podstawą do zbudowania przenośnych przyrządów do pomiarów wzn silników w warunkach *off-line*. Na rys. 14 przedstawiono prototypową sondę do pomiarów wzn zbudowaną przez autora w oparciu o antenę paskową. Zbudowano również sondę w oparciu o antenę na bazie termorezystorów.

Anteny przenośne (rys. 15 i 18) są bardzo przydatne do dokładnego określenia miejsca emisji wzn z uzwojeń silnika. Wskazują bardzo wyraźnie miejsca osłabienia izolacji uzwojeń. Na rys. 16 przedstawiono pomiar *off-line* wzn stojana silnika o mocy 4,4 MW wykonywany wspomnianą sondą z wykorzystaniem miernika wartości szczytowej. Korzystając z son-



Rys. 16. Miejsce osłabienia izolacji na stojanie wykryte prototypową sondą wykorzystującą antenę przenośną



Rys. 17. Sonda z anteną przenośną do pomiarów *off-line* wzn maszyni elektrycznych



Rys. 18. Pomiar *off-line* wzn stojana silnika o mocy 4,4 MW wykonywany prototypową sondą z wykorzystaniem miernika wartości szczytowej

dy, wykryto dwa miejsca wyraźnego osłabienia stanu izolacji uzwojeń stojana (rys. 16). Izolację uzwojenia stojana poddano lokalnemu remontowi właśnie w tych miejscach.

Uwagi końcowe

W trakcie badań własnych autor wykazał bardzo dużą użyteczność w pomiarach *off-line* i *on-line* wyładowań niezupełnych silników, układów antenowych typu termorezystory RTD wraz z zespołami antenowymi. Termorezystory RTD mają dużą czułość na wzn powstające blisko danego RTD, zależy to od budowy danego silnika. Instalację aparatury pomiarowej można wykonać bez zatrzymywania silnika, korzystając z fabrycznie zamontowanych czujników temperatury i ich wyprowadzeń znajdujących się na zewnątrz silnika. Pomiar wzn przez poszczególne termorezystory umieszczone w silniku daje możliwość lokalizowania miejsc generowania wzn, czyli miejsc osłabienia izolacji uzwojeń. Autor proponuje powyższe uwagi uwzględnić przy projektowaniu nowych silników elektrycznych, aby już fabrycznie przygotować silnik do takich pomiarów. W pomiarach wzn silników istotnym uzupełnieniem termorezystorów zainstalowanych fabrycznie mogą być RTD zainstalowane dodatkowo w czasie przeglądu silnika bądź jego remontu od strony napędowej i przeciwnapędowej w obszarach najbliższych części czołowej uzwojeń. Szczególnie ważny jest obszar początków uzwojeń fazowych, połączeń międzycewkowych, międzygrupowych. Zespół czujników oparty na wykorzystaniu

RTD można dodatkowo uzupełnić czujnikami antenowymi typu długi przewód ($L \gg d$), umieszczonymi wokół czół w postaci pętli bądź fragmentów pętli, są to tzw. anteny pętlowe. Ten rodzaj czujnika jest szczególnie interesujący, bo przy sprzyjających okolicznościach (możliwość nawinięcia wokół czół pełnej wielokrotnej pętli) ma strefę widzenia wzn pełne 360° . Oznacza to możliwość mierzenia wszystkich wyładowań w strefie czół. Do pomiarów wzn maszyn elektrycznych w szczególności *off-line* z powodzeniem można stosować anteny paskowe. Jest to bardzo przydatny pomiar w warunkach stacji prób zakładu remontowego. Można określić obszary uzwojenia mające pogorszoną izolację uzwojeń. Autor w badaniach własnych stwierdził bardzo dużą przydatność do lokalizacji miejsc emisji wzn anten przenośnych. Proponowane przez autora własne rozwiązania czujników do pomiarów wzn w maszynach elektrycznych w warunkach przemysłowych sprawdziły się. Wyniki pomiarów wzn silników zależą od: stanu ich izolacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wzn i aparatury analizującej wzn.

Literatura

- [1] ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikacyjna. 2003.
- [2] BERTENSHAW D., SASIC M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Case studies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [3] BLOKHINTSEV I., GOLOVKOV M., GOLUBEV A., KANE C.: *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*. IEEE PES'98, February 1–5, Tampa.
- [4] 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.
- [5] KANE C., POZONSKY J., CARNEY S., BLOKHINTSEV I.: *Advantages of Continuous Monitoring of Partial Discharges in Rotating Equipment and Switchgear*. 2003 AISE Meeting, Pittsburgh, PA, Sept. 2003.
- [6] MATUSZCZYK J.: *Poradnik antenowy*. WKŁ, Warszawa 2002.
- [7] STONE G.C., BOULTER E.A., CULBERT I., DHIRANI H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA 2004.
- [8] 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.

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów *off-line* i *on-line* wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



dr hab. inż. Sławomir Szymaniec,
prof. Politechniki Opolskiej – Instytut Układów
Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,
Politechnika Opolska;
e-mail: s.szymaniec@po.opole.pl

artykuł recenzowany