

## PRZYRZĄD WIRTUALNY DO SZACOWANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU MOCY CHWILOWEJ

Ariel DZWONKOWSKI

Politechnika Gdańska, Katedra Metrologii i Systemów Informacyjnych  
tel.: 58 347 1778 e-mail: ariel.dzwonkowski@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zagadnienie dotyczące wykorzystania przyrządu wirtualnego do szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej. Analiza dotyczy układu do diagnostyki łożysk tocznych, składającego się z przetworników: napięcia oraz prąd-napięcie, który wykorzystano do badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych metodą, opartą na pomiarze i analizie sygnałów napięcia i prądu pobieranych przez maszynę. Zaprezentowano opracowany do celów szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej przyrząd wirtualny, który do wyznaczania niepewności metodą Typu A wykorzystuje jacobiany macierzy, natomiast do obliczenia niepewności metodą Typu B używa danych, dotyczących dokładności karty akwizycji danych i przetworników. Dokonano także sprawdzenia poprawności działania przyrządu wirtualnego, przedstawiono przykładowe wyniki analiz i porównano je z rezultatami obliczeń wykonanymi przy wykorzystaniu arkusza kalkulacyjnego MS Excel.

**Słowa kluczowe:** niepewność pomiaru, moc chwilowa, przyrząd wirtualny, jacobiany macierzy.

### 1. WSTĘP

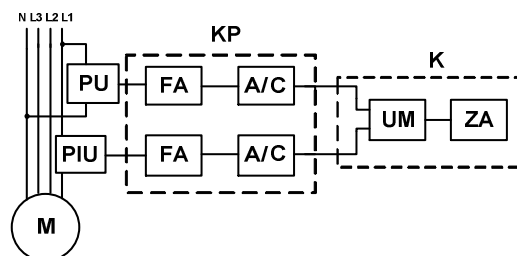
W silnikach indukcyjnych uszkodzeniu mogą ulec podzespoły takie jak: łożyska, wał lub uzwojenia stojana czy wirnika. Ponieważ z danych statystycznych wynika, iż najczęściej awarie maszyn indukcyjnych spowodowane są uszkodzeniami łożysk [1, 2], tematyka dotycząca oceny stanu technicznego łożysk jest bardzo istotna, zarówno pod względem technicznym jak i ekonomicznym, i stanowi główny element procesu nadzorowania pracy maszyn.

Diagnostykę łożysk można przeprowadzić w oparciu o bezinwazyjną metodę, która opiera się na pomiarze i analizie sygnału mocy chwilowej, która wyznaczana jest jako iloczyn wartości chwilowych natężenia prądu i napięcia zasilających silniki.

W metodzie wykorzystano zjawisko polegające na fakcie, iż kontakt uszkodzonego fragmentu łożyska z innym elementem łożyska skutkuje chwilowym wzrostem momentu oporowego, co w konsekwencji przekłada się na wahania mocy pobieranej przez maszynę. Zjawisko to skutkuje pojawieniem się dodatkowych harmonicznych w widmie sygnału mocy chwilowej [1]. Składowe te można wykorzystać jako symptom diagnostyczny, na podstawie którego możliwe jest dokonanie oceny stanu technicznego łożysk w maszynach indukcyjnych.

### 2. BADANIA DIAGNOSTYCZNE ŁOŻYSK SILNIKÓW INDUKCYJNYCH METODĄ ANALIZY MOCY CHWILOWEJ

Sposób przeprowadzania badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk opiera się na wykorzystaniu iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia, analizie widmowej uzyskanego sygnału oraz określeniu częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzeń a następnie ich identyfikacji w widmie mocy chwilowej. Częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzeń zależą od prędkości obrotowej maszyny oraz budowy łożyska i wyznaczane są na podstawie zależności znanych z literatury [1, 2]. W opisywanej metodzie pomiar przeprowadzany jest poprzez pobranie sygnału, będącego miarą natężenia prądu oraz napięcia zasilającego silnik indukcyjny. Proces kondycjonowania sygnału prądu realizowany jest przy wykorzystaniu przetwornika prąd-napięcie CT-5T, natomiast kondycjonowanie sygnału napięcia realizowane jest przy użyciu przetwornika napięcia CV3-500 [1]. Zakres częstotliwości przetwarzania wynosi 0 Hz – 500 kHz a przekładnia 5A/5V. Z kolei przetwornik napięciowy przeznaczony jest do pomiarów napięć stałych i zmiennych o wartości skutecznej napięcia do 350 V. Przekładnia przetwornika CV3-500 wynosi 500V/10V. Następnie oba sygnały doprowadzane są do systemu pomiarowego, którego głównym elementem jest karta akwizycji danych NI PXI 4462 zainstalowana w kasecie pomiarowej NI PXI 1031 [3]. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego z systemem NI PXI 1031: PU – przetwornik napięcia, PIU – przetwornik prąd/napięcie, FA – filtr antyaliasingowy, A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy, KP – kasecja pomiarowa NI PXI 1033 wraz z kartą akwizycji danych PXI 4462, K – komputer klasy PC wraz z oprogramowaniem, UM – blok programu mnożący prąd i napięcie, ZA – program do analizy widma mocy chwilowej [1]

Badano maszyny typu STG80X-4C o danych znamionowych:  $P_n = 1,1$  kW,  $U_n = 400/230$  V,  $I_n = 2,9/5$  A. Pomiary wykonano zarówno dla silników nieuszkodzonych, jak i z różnymi typami uszkodzeń łożysk.

### 3. SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU MOCY CHWILOWEJ

Analiza metrologiczna systemu do diagnostyki łożysk, wykorzystującego sygnał mocy chwilowej miała na celu sprecyzowanie, jakiej niepewności pomiarowej należy oczekiwać, dokonując pomiarów przedstawioną metodą.

W wykorzystywanym do pomiarów mocy chwilowej  $p(t)$  układzie pomiarowym funkcję pomiaru przedstawia wzór [1]:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (1)$$

Ze względu na fakt, iż jest to pomiar pośredni [4], zgodnie z prawem propagacji niepewności, niepewność  $u(p)$  przedstawia zależność:

$$u(p) = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial u}\right)^2 u^2(u) + \left(\frac{\partial p}{\partial i}\right)^2 u^2(i) + 2 \frac{\partial p}{\partial u} \frac{\partial p}{\partial i} u(u)u(i)r(u,i)}, \quad (2)$$

gdzie:  $u(u)$  - niepewność pomiaru napięcia,  $u(i)$  - niepewność pomiaru natężenia prądu,  $r(u, i)$  - współczynnik korelacji równy:

$$r(u, i) = \frac{u(u, i)}{u(u)u(i)}. \quad (3)$$

Z powyższych rozważań wynika, iż w celu wyznaczenia niepewności pomiaru mocy chwilowej  $u(p)$  należy wyznaczyć trzy parametry: wariancję pomiaru napięcia  $u^2(u)$ , wariancję pomiaru natężenia prądu  $u^2(i)$  oraz współczynnik korelacji pomiędzy prądem i napięciem  $r(u, i)$ .

W celu oszacowania niepewności pomiaru napięcia należy wyznaczyć wariancję wynikającą z błędów losowego pomiaru napięcia, a także wariancję związaną z błędem przetwornika napięcia oraz wariancję estymacji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych. Natomiast aby oszacować niepewność pomiaru natężenia prądu należy wyznaczyć wariancję wynikającą z błędów losowego pomiaru natężenia prądu, a także wariancję związaną z błędem przetwornika prąd/napięcie oraz wariancję estymacji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych.

Niepewność pomiaru napięcia metodą Typu A wyznaczono jako odchylenie wyników pomiarów od wielomianu aproksymującego [3, 5]. Niepewność tę opisuje poniższa zależność:

$$u_A(u) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{l=0}^m a_l x_i^l \right)^2}{n - m - 1}}, \quad (4)$$

gdzie:  $a$  - współczynniki wielomianu aproksymującego,  $n$  - liczba punktów aproksymowanych,  $m$  - stopień wielomianu aproksymującego.

Pozostałe wartości niepewności wyznaczono metodą Typu B, na podstawie danych podanych przez producentów: karty akwizycji danych oraz przetworników napięcia i prądu.

napięcie. Niepewność tę oszacowano zgodnie ze wzorem [4]:

$$u_B(u) = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial u_u}\right)^2 u^2(u_u) + \left(\frac{\partial u}{\partial u_D}\right)^2 u^2(u_D)}, \quad (5)$$

gdzie:  $u_B(u)$  - niepewność pomiaru napięcia,  $u^2(u_D)$  - wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych,  $u^2(u_u)$  - wariancja wynikająca z błędów granicznego przetwornika napięcia.

Estymata wariancji pomiaru napięcia  $u^2(u_D)$ , przy założeniu trójkątnego rozkładu prawdopodobieństwa, została określona na podstawie zależności [6]:

$$u^2(u_D) = \left( \frac{(E_u \cdot \delta E_{\%G}) + (E_u \cdot \delta E_{\%F}) + \Delta E_0}{\sqrt{6}} \right)^2, \quad (6)$$

gdzie:  $E_u$  - wartość sygnału wejściowego,  $\delta E_{\%G}$  - błąd wzmacnienia,  $\delta E_{\%F}$  - błąd płaskości,  $\Delta E_0$  - błąd przesunięcia zera.

Wybór takiego rozkładu podyktowany był przez fakt, iż z wyników badań uzyskanych w innym eksperymencie wskazania grupowały się w większości wokół wartości modalnej.

Wariancję wynikającą z błędów granicznego przetwornika napięcia CV3-500 oszacowano, przy założeniu trójkątnego rozkładu prawdopodobieństwa, wykorzystując wzór [7]:

$$u^2(u_u) = \left( \frac{(E_u \cdot \delta E_{\%R}) + \Delta E_0}{\sqrt{6}} \right)^2, \quad (7)$$

gdzie:  $\delta E_{\%R}$  - błąd względny, zależny od wartości mierzonej.

Niepewność złożona pomiaru napięcia została obliczona na podstawie zależności [4, 5]:

$$u(u) = \sqrt{u_A^2(u) + u_B^2(u)}. \quad (8)$$

Następnie dla wybranego współczynnika rozszerzenia  $k$  dokonywano oszacowania niepewności rozszerzonej  $U_u$  pomiaru napięcia, korzystając z wzoru:

$$U_u = k \cdot u(u). \quad (9)$$

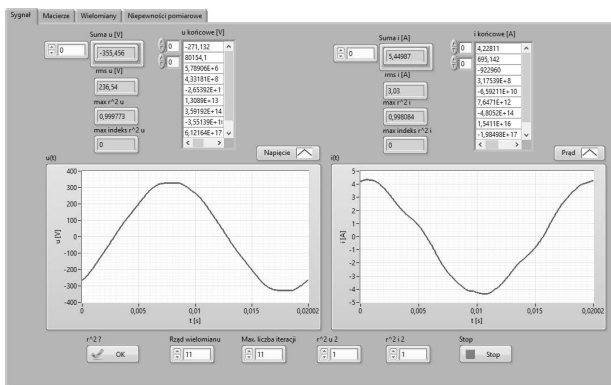
Analogicznie postępowano przy wyznaczaniu niepewności dla uzyskanych wyników pomiarów natężenia prądu.

### 4. PRZYRZĄD WIRTUALNY DO SZACOWANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU MOCY CHWILOWEJ

Do realizacji przyrządu wirtualnego do szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej wybrano środowisko programowania LabVIEW. Opracowano aplikację o nazwie „Moc-Niepewność”, która, oprócz wyznaczenia wartości niepewności pomiaru, umożliwia archiwizację i wizualizację danych. Ponadto program ten pozwala na odczyt danych pomiarowych zapisanych uprzednio w pliku.

Panel zaprojektowanego przyrządu wirtualnego składa się z czterech zakładek: „Sygnał” - w której

prezentowane są zmierzone krzywe napięcia i natężenia prądu, „Macierze”, gdzie przedstawione są rezultaty obliczeń macierzowych, „Wielomiany”, w której prezentowane są zarówno przebiegi prądu i napięcia oraz wykresy i wyznaczone współczynniki wielomianów aproksymujących wraz ze współczynnikiem determinacji  $r^2$ , oraz z zakładki „Niepewności”, w której umieszczono dedykowane pola do wprowadzenia danych, dotyczących dokładności użytych przyrządów pomiarowych oraz wyniki szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej. Na rysunku 2 przedstawiono widok zakładki „Sygnał” opracowanej aplikacji.



Rys. 2. Widok zakładki „Sygnał” opracowanego przyrządu wirtualnego „Moc-Niepewność”

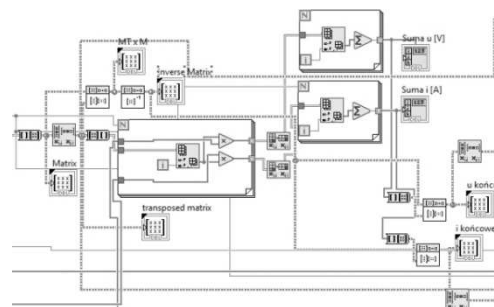
Algorytm oprogramowania komputerowego do szacowania niepewności pomiaru przedstawia się następująco: w pierwszym etapie wyznaczany jest współczynnik determinacji  $r^2$ , określający stopień dopasowania wielomianów aproksymujących do krzywych prądu i napięcia, następnie metodą najmniejszych kwadratów dopasowuje się krzywe do punktów pomiarowych, dalej obliczane są współczynniki wielomianów aproksymujących, wykorzystując jacobiany macierzy. Na tej podstawie i zgodnie z zależnością (4) dokonywane jest szacowanie niepewności metodą Typu A pomiaru prądu i napięcia. W kolejnym kroku obliczany jest współczynnik korelacji  $r(u, i)$  pomiędzy sygnałem prądu i napięcia oraz, na podstawie danych podanych przez producentów w specyfikacji wykorzystanych przetworników oraz karty akwizycji danych wyznaczone są pozostałe wartości jako niepewność Typu B. W ostatnim etapie wyznaczana jest niepewność złożona oraz, przy założonym współczynniku rozszerzenia  $k$ , niepewność rozszerzona pomiaru mocy chwilowej. Na rysunku 3 przedstawiono fragment kodu źródłowego przyrządu wirtualnego „Moc-Niepewność”.

Opracowany przyrząd wirtualny może dokonywać obliczeń w jednym z dwóch trybów pracy. W pierwszym użytkownik wprowadza żądany stopień wielomianu aproksymującego, w drugim natomiast może ustalić liczbę iteracji, która ma zostać wykonana, w celu wyznaczenia sumy algebraicznej, przy czym w każdej kolejnym powtórzeniu rząd wielomianu aproksymującego zwiększany jest o 1.

Rozwiązanie takie pozwala na szybkie i dokładne wyznaczenie stopnia wielomianu, dla którego współczynnik  $r^2$  jest najbliższy jedności oraz obliczenie współczynników tego wielomianu.

W celu weryfikacji poprawności pracy przyrządu wirtualnego przeprowadzono analizy dla szeregu wyników

pomiarów natężenia prądu i napięcia. Dla porównania wykonywano także analogiczne obliczenia w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel.

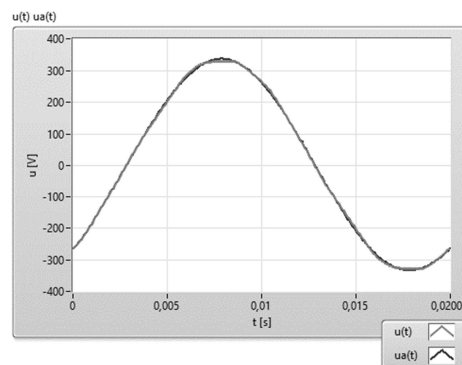


Rys. 3. Fragment kodu źródłowego przyrządu wirtualnego „Moc-Niepewność”

Poniżej przedstawiono przykładowe rezultaty szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej, wykonane przy wykorzystaniu opracowanego przyrządu wirtualnego, dla wyników pomiarów diagnostycznych uzyskanych z badań łożyska ze średnim uszkodzeniem bieżni zewnętrznej.

Po przeprowadzeniu wstępnych obliczeń, polegających na wykonaniu 30 iteracji okazało się, iż najlepsze rezultaty uzyskano dla wielomianów jedenastego stopnia (współczynnik determinacji  $r^2 \approx 1$ ).

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru napięcia  $u(t)$  dla silnika przy obciążeniu równym 70%  $I_n$  wraz z krzywą wyznaczonego wielomianu aproksymującego  $u_a(t)$ .



Rys. 4. Wyniki pomiaru napięcia  $u(t)$  dla silnika z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska przy obciążeniu równym 70%  $I_n$  wraz z krzywą wyznaczonego wielomianu aproksymującego  $u_a(t)$

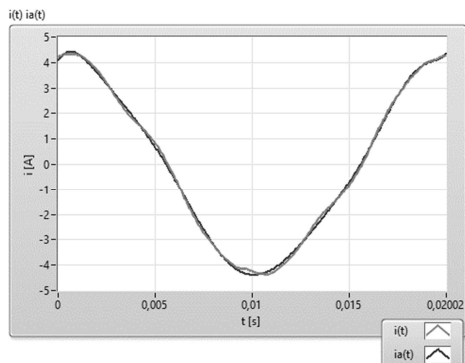
Następnie, zgodnie z algorytmem, przyrząd wirtualny dokonał obliczeń, w wyniku których oszacowana niepewność metodą Typu A  $u_A(u)$  wynosi 3,50 V.

Analogicznie postępowano przy wyznaczaniu niepewności metodą Typu A dla uzyskanych wyników pomiarów natężenia prądu. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiaru natężenia prądu  $i(t)$  dla silnika z uszkodzonym łożyskiem przy obciążeniu równym 70%  $I_n$  wraz z krzywą wyznaczonego wielomianu aproksymującego  $i_a(t)$ .

Wartość oszacowanej niepewności metodą Typu A pomiaru prądu wynosi  $u_A(i) = 96,0$  mA. Następnie obliczony został współczynnik korelacji pomiędzy sygnałami prądu i napięcia, który w rozpatrywanym przypadku wyniósł  $r(u, i) = -0,70$ .

W kolejnym etapie, na podstawie danych dotyczących dokładności wykorzystanych przyrządów, z których wynika iż błąd przetwornika CT-5T nie przekracza  $\pm 0,1\%$  wartości skutecznej prądu znamionowego a wartość napięcia offsetu

wynosi  $\pm 0,6$  mV, natomiast dla przetwornika CV3-500 maksymalny błąd nie przekracza  $\pm 0,2\%$  wartości skutecznej napięcia znamionowego a wartość napięcia offsetu wynosi 5,00 mV, przyrząd wirtualny dokonał szacowania niepewności Typu B, zgodnie z zależnościami (5-7).



Rys. 5. Wyniki pomiaru prądu  $i(t)$  dla silnika z uszkodzeniem łożysk zewnętrznego przy obciążeniu równym  $70\% I_n$  wraz z krzywą wyznaczonego wielomianu aproksymującego  $i_a(t)$

Wartości tych niepewności pomiaru napięcia i natężenia prądu wynoszą odpowiednio:  $u_B(u) = 10,90$  mV oraz  $u_B(i) = 8,45$  mA.

Następnie dokonano oszacowania niepewności złożonych, które wynoszą: dla pomiaru napięcia  $u(u) = 3,50$  V, a dla pomiaru prądu  $u(i) = 96,35$  mA.

W kolejnym kroku wykonywanego algorytmu przyrząd wirtualny dokonał, zgodnie z zależnością (2), oszacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej, która wynosi  $u(p) = 17,22$  VA. Następnie dla współczynnika rozszerzenia  $k = 2$ , co odpowiada w przybliżeniu prawdopodobieństwu rozszerzenia wynoszącemu 95%, oszacowano niepewność rozszerzoną pomiaru mocy chwilowej. Wartość tej niepewności to  $U_p = 34,4$  VA. Uzyskane wyniki szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej, dla rozpatrywanego przypadku, w pełni pokrywają się z rezultatami otrzymanymi z obliczeń wykonanych w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono przyrząd wirtualny przeznaczony do szacowania niepewności pomiaru mocy chwilowej, dla układu, zbudowanego z przetwornika napięcia oraz przetwornika prąd-napięcie, który został wykorzystany do nieniszczących badań diagnostycznych łożysk w silnikach indukcyjnych.

## VIRTUAL INSTRUMENT FOR ESTIMATING INSTANTANEOUS POWER MEASUREMENT UNCERTAINTY

The paper presents the issue of the use of a virtual device to estimate the uncertainty of a system for rolling bearing diagnostics using a research method based on measuring and analysing the instantaneous power signal consumed by an induction motor. The virtual instrument developed for the purpose of estimating the uncertainty of instantaneous power measurement has been used to estimate the uncertainty of Type A instantaneous power measurement using Jacobian matrix, while to calculate the uncertainty of Type B uses the data on the accuracy of instruments used, given by their manufacturers. For comparison, calculations of uncertainty of instantaneous power measurement were also made using the MS Excel spreadsheet. In both cases, the obtained results were identical. In the case under consideration, the result of instantaneous power measurement, with a voltage of 236.54 V and a current value of 3.03 A, can be represented as:  $p = (716.72 \pm 34.44)$  VA. The developed virtual instrument can be used to estimate the uncertainty of measurement of other physical quantities, e.g. temperature or pressure.

**Keywords:** measurement uncertainty, instantaneous power, bearings diagnostic, Jacobian matrix.

Opracowana aplikacja, do wyznaczenia niepewności metodą Typu A, wykorzystuje macierze jacobianów i umożliwia szybkie ustalenie stopnia wielomianu aproksymującego, dla którego współczynnik determinacji  $r^2$  jest najbliższy jedności. Rozwiązanie to ułatwia użytkownikowi przeprowadzanie analiz dotyczących składnika losowego niepewności. Natomiast do obliczenia niepewności metodą Typu B wykorzystywane są dane, dotyczące błędów przyrządów pomiarowych, zawarte w notach katalogowych. Dla porównania przeprowadzono też obliczenia niepewności pomiaru mocy chwilowej wykorzystując arkusz kalkulacyjny MS Excel. W obu przypadkach uzyskane wyniki były identyczne. Dla rozpatrywanego przypadku, rezultat pomiaru mocy chwilowej, przy wartości napięcia 236,54 V oraz wartości natężenia prądu 3,03 A, można przedstawić jako:  $p = (716,7 \pm 34,4)$  VA.

Opracowany przyrząd wirtualny może zostać wykorzystany do szacowania niepewności pomiaru innych wielkości fizycznych np. temperatury czy ciśnienia.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Dzwonkowski A.: Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. Politechnika Gdańska: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2018, 105 s., ISBN 978-83-7348-726-0.
2. Bellini A., Cocconcelli M., Immovilli F., Rubini R., Diagnosis of mechanical faults by spectral kurtosis energy, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008, p. 3079 – 3083.
3. NI PXI 4462, Datasheet, <http://www.ni.com/pdf/manuals/373770j.pdf>, 16.03.2017.
4. Evaluation of measurement data — An introduction to the Guide to the expression of uncertainty in measurement and related documents, JCGM 104:2009.
5. Tomašević N., Tomašević M., Stanivuk T.: Regression analysis and approximation by means of Chebyshev polynomial, Informatologia 42, 2009, 3, p. 166-172.
6. National Instruments, Absolute Accuracy of Dynamic Signal Acquisition Devices - <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/BA704FDCBB6C9C4E86256FAC006DB66B?OpenDocument>, 16.03.2017.
7. Golijanek-Jędrzejczyk A.: Badanie metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej wykorzystującej składowe fazora napięcia, Gdańsk: Wydaw. PG, 2012, ISBN 978-83-7348-404-7.