

**Anna SZLACHTA, Adam KOWALCZYK**

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

## Zastosowanie warunkowego uśredniania sygnałów w pomiarach kąta przesunięcia fazowego

**Dr inż. Anna SZLACHTA**

Absolwentka Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej – specjalność aparatura elektroniczna (1995). W 2006 r. uzyskała tytuł doktora nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej elektrotechnika, specjalność metrologia elektryczna i elektroniczna. Zajmuje się zagadnieniami analizy i przetwarzania sygnałów pomiarowych, w szczególności w zakresie pomiarów kąta przesunięcia fazowego sygnałów zakłóconych.



e-mail: annasz@prz.edu.pl

**Dr hab. inż. Adam KOWALCZYK**

Profesor nadzwyczajny Politechniki Rzeszowskiej, Kierownik Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych. Absolwent Politechniki Śląskiej (1973). Stopień doktora uzyskał w 1983 r., a doktora habilitowanego w 1992 r. Dyscyplina i specjalności naukowe: elektronika, metrologia elektryczna i elektroniczna, systemy pomiarowe wielkości nieelektrycznych, przetwarzanie sygnałów stochastycznych. Jest współautorem 2 książek, autorem i współautorem ponad 100 prac naukowych i ponad 20 opracowań zastosowanych w przemyśle.



e-mail: kowadam@prz.edu.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę warunkowego uśredniania sygnałów w pomiarach kąta przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych zakłóconych. W zaproponowanej metodzie uśredniane są zbiory kolejnych realizacji sygnału opóźnionego. Na podstawie warunkowej wartości średniej według zaproponowanych algorytmów może być wyznaczany poszukiwany kąt przesunięcia fazowego.

**Słowa kluczowe:** przesunięcie fazowe, uśrednianie warunkowe, sygnały opóźnione, modele pomiaru, sygnały zakłócone.

### The application of conditional averaging of signals in phase angle measurements

#### Abstract

The method of phase measurement by conditional averaging of signal has been presented in this paper. The proposed method of a phase shift angle measurement is based on conditional averaging of delayed signals. The phase angle can be determined on the basis of conditional averaging value of elaborated algorithms.

**Keywords:** phase angle, conditional averaging, delayed signals, measurement models, noised signals.

### 1. Wprowadzenie

W wielu pomiarach, w tym w pomiarach kąta przesunięcia fazowego, występują zakłócenia, najczęściej o charakterze przypadkowym. Te niepożądane sygnały, są często, przyczyną nieprawidłowej pracy różnych części układu pomiarowego. Określenie wpływu przypadkowych zakłóceń na przebieg różnych procesów fizycznych jest jednym z podstawowych problemów w wielu dziedzinach nauki i techniki, także techniki pomiarowej. Przy coraz większej złożoności rozpatrywanych zjawisk, teoretyczne określenie wpływu zakłóceń jest trudne i często niemożliwe, a jedyną drogą rozwiązywania problemów jest eksperymentalne badanie zjawisk. W szczególności, badania symulacyjne nowych metod pomiaru są ważnym etapem poznawczym, pozwalającym uzyskiwać informację o właściwościach przyjętych modeli pomiaru w sposób szybki oraz korzystny technicznie i ekonomicznie.

W pomiarach kąta przesunięcia fazowego najczęściej spotykane zakłócenia wynikają z występowania szumu, składowych harmonicznych oraz składowej stałej w sygnale. Fazomierze elektroniczne z przetwarzaniem kąta przesunięcia fazowego w odstęp czasu są układami mało odpornymi na zakłócenia losowe [6]. Zniekształcenia losowe wpływają na dokładność określenia przejścia przez zero obydwu przebiegów i mają bezpośredni wpływ na dokładność pomiaru odcinka czasu, odpowiadającego przesunięciu fazowemu  $\varphi$  pomiędzy badanymi sygnałami [2, 10].

Poprawę dokładności pomiaru kąta przesunięcia fazowego dla sygnałów zakłóconych można uzyskać stosując metody algorytmiczne wykorzystujące analizę statystyczną, np. wyznaczenie korelacji wzajemnej dwóch, przesuniętych o kąt  $\varphi$ , sygnałów oraz algorytm wielopunktowy [2, 3].

Metoda korelacyjna wykorzystuje informacje statystyczną zawartą w sygnałach zakłóconych. Błąd fazomierza korelacyjnego zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości szumu oraz wyższych harmonicznych. Moduł błędu przybiera wartość maksymalną dla kątów przesunięcia fazowego  $0^\circ$  i  $180^\circ$  oraz minimalną dla  $90^\circ$ , (ze względu na wykorzystanie funkcji  $\arccos$ ). Do wad metody korelacyjnej należy zaliczyć: ograniczenie częstotliwości badanego sygnału (do częstotliwości rzędu kHz), złożoność realizacji funkcji oraz cosinusoidalny charakter funkcji przetwarzania i zakres pomiarowy ( $0^\circ \div 180^\circ$ ) [12].

Innym możliwym sposobem pomiaru wartości kąta przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych zakłóconych szumem szerokopasmowym może być algorytm aproksymacyjny wielopunktowy przedstawiony w pracach [2, 3]. Przy opracowywaniu algorytmu przyjęto założenie, iż próbki, na podstawie, których wyznaczone są współczynniki prostych regresji, są symetrycznie rozłożone względem chwili czasu przejścia sygnału przez poziom zerowy. Algorytm wielopunktowy przystosowany jest do pracy z sygnałami sinusoidalnie zmiennymi. Dla takich sygnałów punkt przejścia przez zero pokrywa się z punktem, w którym występuje maksymalna wartość pochodnej sygnału. Jej wartość można wyznaczyć za pomocą współczynnika kierunkowego prostej regresji. Warunkiem wysokiej odporności proponowanego estymatora na zakłócenia jest dostatecznie duża liczba próbek zawartych w stosowanym oknie czasowym. Metoda wielopunktowej aproksymacji pozwala na poprawę dokładności pomiaru kąta przesunięcia fazowego w przypadku występowania szumu szerokopasmowego o zerowej wartości średniej. Metoda ta traci swoje zalety dla zakłóceń w paśmie częstotliwości obejmującym lub zbliżonym do częstotliwości analizowanych przesuniętych w fazie sygnałów.

### 2. Modele przetwarzania sygnałów w pomiarach kąta przesunięcia fazowego wykorzystujące warunkowe uśrednianie

Warunkową wartość średnią dla dwóch sygnałów sinusoidalnych  $x(t) = A_x \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_x)$  i  $y(t) = A_y \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_y)$ , zakładając wartości realizacji procesów w chwilach  $t_1$  i  $t_2$  ( $\tau = t_2 - t_1$ ), można przedstawić w postaci zależności [7]:

$$E[y|_{x=0}] = -A_y \sin(\omega \cdot \tau + \varphi), \quad (1)$$

gdzie:  $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  jest kątem przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami  $x(t)$  i  $y(t)$ .

Jeżeli przyjąć założenie, że sygnał odniesienia  $x(t)$  nie zawiera szumu  $n(t)$  (szum  $N(0, \sigma_n)$ ), natomiast addytywnie zakłócony jest jedynie sygnał opóźniony  $z(t) = y(t) + n(t)$ , to wówczas warunkowa wartość oczekiwana sygnału, przy warunku  $x(t) = 0$ , przyjmuje postać [5]:

$$E[z|_{x=0}] = E[y|_{x=0}] + E[n|_{x=0}] = -A_y \sin(\omega_0 \tau + \varphi). \quad (2)$$

Operacja prostowania sygnału opóźnionego umożliwia otrzymanie charakterystycznych punktów, w których funkcja warunkowej wartości oczekiwanej osiąga wartości minimalne (zero dla sygnału bez zakłóceń) [4, 8].

Wartość oczekiwana wyprostowanego sygnału opóźnionego, dla modelu z małym poziomem zakłóceń, przyjmuje uproszczoną postać:

$$E[z|_{x=0}] \approx |E[z|_{x=0}]| \approx -A_y \sin(\omega_0 \tau + \varphi) = A_y \sin(\omega_0 \tau + \varphi). \quad (3)$$

### 3. Pomiarowe wykorzystanie modeli warunkowego uśredniania sygnałów

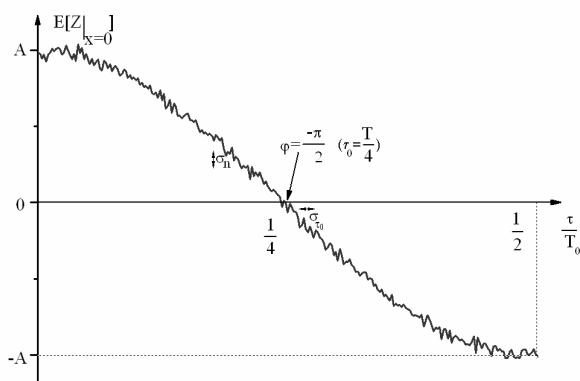
Dla przedstawionych modeli matematycznych można zaproponować odpowiednie zasady wykorzystujące warunkowe uśrednianie (tabela 1) [9].

Tab. 1. Sposób pomiarowego wykorzystania modeli matematycznych  
Tab. 1. Method of application of mathematical models

| Modele matematyczne          | Zasady pomiaru     | Algorytmy pomiarowe    |
|------------------------------|--------------------|------------------------|
| Model matematyczny (1) i (2) | I zasada pomiaru   | Algorytm „arcus sinus” |
|                              | II zasada pomiaru  | Algorytm 1             |
| Model matematyczny (3)       | III zasada pomiaru | Algorytm 2             |

Przykładowo stosując algorytm 1 charakterystykę warunkowej wartości średniej  $E[z|_{x=0}]$  opisaną wzorem (2) można zastosować

do wyznaczenia wartości kąta przesunięcia fazowego, identyfikując czas  $\tau_0$ , odpowiadający momentowi przejścia proponowanej charakterystyki przez poziom zerowy, gdy jej pochodna ma wartość ujemną (rys. 1).



Rys. 1. Charakterystyka warunkowej wartości oczekiwanej dla  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

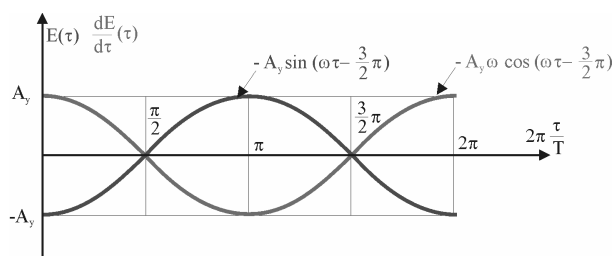
Fig. 1. The conditional averaging characteristic for  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

Warunki określające przedstawioną zasadę pomiaru kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$ :

$$E[y|_{x=0}] = -A_y \sin(\omega \tau_0 + \varphi) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dE[y|_{x=0}]}{d\tau} = -A_y \omega \cos(\omega \tau_0 + \varphi) < 0. \quad (5)$$

Na rysunku 2 przedstawiona została interpretacja graficzna powyższych warunków.



Rys. 2. Ilustracja graficzna warunków (4) i (5) dla  $\varphi = -\frac{3}{2}\pi$

Fig. 2. The graphics presentations of conditions (4) and (5) for  $\varphi = -\frac{3}{2}\pi$

Przy uwzględnieniu warunków (4) i (5), otrzymuje się jednoznaczną charakterystykę:

$$\varphi = -\omega \cdot \tau_0 = -2\pi \frac{\tau_0}{T}, \quad (6)$$

$$\text{dla } -\frac{3}{2}\pi < \varphi < \frac{\pi}{2}.$$

Przy zastosowaniu algorytmu 2, dla proponowanej zasady pomiaru, wykorzystującej warunkową wartość oczekiwaną modułu sygnału opóźnionego, poszukiwaną wartość kąta przesunięcia fazowego wyznacza się ze wzoru:

$$\varphi = -\frac{t_{01}}{T} 2\pi, \quad (7)$$

$$\text{dla } -\pi \leq \varphi \leq 0, t_{01} \text{ czas pierwszego minimum funkcji } E[z|_{x=0}].$$

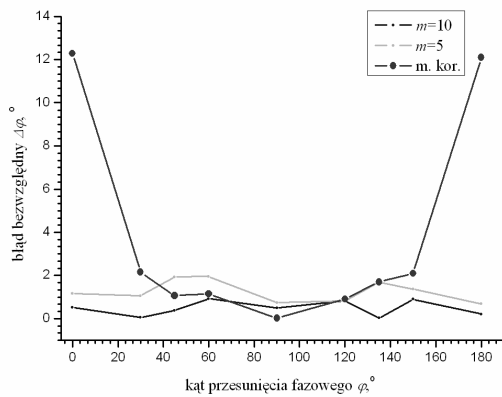
### 4. Wyniki badań symulacyjnych i pomiarów

Dla potrzeb oceny właściwości metrologicznych zaproponowanej metody warunkowego uśredniania sygnałów, zostały zaimplementowane dwie metody algorytmiczne (algorytm wielopunktowy [2] oraz metoda korelacyjna [12]).

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji pomiarów wartości kąta przesunięcia fazowego metodą warunkowego uśredniania, z wykorzystaniem algorytmu 1 (z uwzględnieniem dwóch różnych wartości  $m$  liczby uśrednianych realizacji) oraz metody korelacyjnej, w zależności od wartości SNR, która wyraża stosunek sygnał/szum i opisana jest wzorem:

$$SNR = \frac{S}{N} = \left( \frac{U_{sk}}{\sigma_n} \right)^2, \quad (8)$$

gdzie:  $\sigma_n$  - odchylenie standardowe szumu,  $U_{sk}$  - wartość skuteczna sygnału.



Rys. 3. Wykres błędów bezwzględnych pomiaru kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  dla SNR=26,35,  $f=10$  Hz

Fig. 3. The diagram of absolute error of phase angle measurement  $\varphi$  for SNR = 26.35 and  $f=10$  Hz

Dla porównania wyników pomiarów kąta przesunięcia fazowego metodami rozpatrywanymi w niniejszej pracy, wyznaczono estymator wartości średniokwadratowej błędu pomiaru wartości kąta przesunięcia fazowego  $\Psi_{\Delta\varphi}$  spowodowanego zakłóceniami losowymi, według zależności:

$$\Psi_{\Delta\varphi} = \sqrt{\Delta\varphi^2 + S_{\Delta\varphi}^2} \quad (9)$$

gdzie:  $\overline{\Delta\varphi}$  – wartość średnia,  $S_{\Delta\varphi}$  – estymator odchylenia standardowego  $\Delta\varphi$ .

Badania potwierdziły praktyczną przydatność I zasady pomiaru realizowanej według „algorytmu 1” dla oceny wartości kąta przesunięcia fazowego w zakresie od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  ( $\Psi_{\Delta\varphi} < 1,5^\circ$ ), natomiast dla metody korelacyjnej w zakresie od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  ( $\Psi_{\Delta\varphi} < 10^\circ$ ) [9]. Zaobserwowany wzrost wartości estymatora  $\Psi_{\Delta\varphi}$  na końcach zakresów dla „algorytmu 1” wynika ze sposobu realizacji aplikacji (nieodstająca liczba próbek). Poprawę dokładności „algorytmu 1” na początku zakresu, można uzyskać przy zastosowaniu operacji przedpróbkowania. Dla wartości końcowej poprawa estymacji jest możliwa przy poszerzeniu okna czasowego. W zastosowanej aplikacji, szerokość okna odpowiadała wartości czasowej równej jednemu okresowi przebiegów badanych.

Tabela 2 przedstawia przykładowe wyniki serii ( $n=50$ ) pomiarów kąta przesunięcia fazowego metodą wielopunktową oraz metodą warunkowego uśredniania (algorytm „1”) dla SNR=44.

Tab. 2. Porównanie błędów metody wielopunktowej i warunkowego uśredniania  
Tab. 2. Error comparison of multipoint and conditional averaging method

| Nazwa metody                | Wartość poprawna | Wartość średnia | Odchylenie standardowe eksperymentalne | Odchylenie standardowe eksperymentalne średniej |
|-----------------------------|------------------|-----------------|--|---|
| Warunkowe uśrednianie $m=2$ | $90^\circ$       | $89,5^\circ$    | $3,2^\circ$                            | $0,4^\circ$                                     |
| Algorytm wielopunktowy      | $90^\circ$       | $88,2^\circ$    | $10,4^\circ$                           | $1,5^\circ$                                     |

Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz symulacyjne potwierdzają przydatność metrologiczną zastosowania metody warunkowego uśredniania sygnałów w pomiarach kąta przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych zakłóconych dla sygnałów silnie zakłóconych szumem szerokopasmowym.

Na podstawie przeprowadzonych w ramach pracy pomiarów wykazano możliwość poprawy estymacji wartości kąta przesunięcia fazowego, dla  $\varphi_{odn} = 180^\circ$ , metodą warunkowego uśredniania wartości chwilowych w stosunku do metody korelacyjnej.

Zastosowanie algorytmów wykorzystujących regresję liniową dla warunkowej wartości oczekiwanej, w przypadku pomiaru wartości kątów przesunięcia fazowego zbliżonych do  $0^\circ$ , wymaga przeprowadzenia rejestracji sygnału zanim nastąpi detekcja zera dla sygnału odniesienia (tzw. przedpróbkowanie). W innym przypadku, liczba próbek jest niewystarczająca do prawidłowej oceny wartości kąta przesunięcia fazowego.

## 5. Ocena niepewności wyniku pomiaru

W zasadach pomiaru wykorzystujących aproksymację liniową (algorytm 1 i algorytm 2) kąt przesunięcia fazowego wyznaczany jest ze wzoru  $\varphi_x = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_x$ , a niepewność standardowa  $u_{\varphi_x}$  pomiaru  $\varphi_x$  zależy od niepewności  $u_{t_x}$  pomiaru  $t_x$  i niepewności  $u_f$  pomiaru  $f$ :

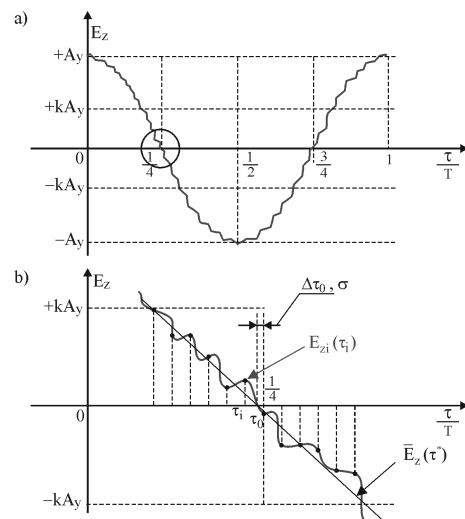
$$u_{\varphi_x} = \sqrt{(2\pi f)^2 u_{t_x}^2 + (2\pi t_x)^2 u_f^2} \quad (10)$$

Przyjęto, że niepewność w ocenie częstotliwości,  $u_f$  jest znikoma mała i można ją pominąć.

W opracowanej metodzie pomiaru przesunięcia fazowego z wykorzystaniem warunkowego uśredniania wartości amplitudowych sygnałów, wyznaczenie kąta przesunięcia fazowego wymaga określenia momentu czasu  $\tau_0$ , proporcjonalnego do odcinka czasu  $t_x$ . Istnieje kilka różnych sposobów (algorytmów) wyznaczenia poszukiwanej chwili czasowej  $\tau_0$ .

Dруга zasada (algorytm 1) uwzględnia dla zakresu  $-\frac{3}{2}\pi < \varphi < \frac{\pi}{2}$  zależność przesunięcia fazowego od czasu  $\tau_0$ , który jest wyznaczony za pomocą aproksymacji liniowej funkcji  $\hat{E}_z = -A_y \sin(\omega_0 \tau + \varphi)$  [9].

Na podstawie uśrednionych  $M$  realizacji sygnału  $y(\tau_i)$  (rys. 4a) uzyskuje się punkty warunkowej wartości średniej  $E_{zi}(\tau_i)$ , które, jako  $N$  punktów o współrzędnych  $(E_{zi}, \tau_i)$ , wykorzystywane są do obliczania współczynników prostych regresji liniowej:  $\bar{E}_z(\tau^*)$  oraz  $\bar{\tau}(E_z^*)$  (rys. 4b).



Rys. 4. Ilustracja wyznaczenia czasu przejścia przez zero prostej  $\bar{E}_z(\tau^*)$  dla

$\varphi = -\frac{\pi}{2}$  otrzymanej za pomocą warunkowego uśredniania wartości amplitudowych sygnałów:

a) charakterystyka  $\bar{E}_z(\tau)$ ,

b) powiększenie charakterystyki  $\bar{E}_z(\tau)$  w okolicy  $\tau_0$  oraz prosta  $\bar{E}_z(\tau^*)$

Fig. 4. Cross zero detection of straight line  $\bar{E}_z(\tau^*)$  obtained from conditional

averaging for  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$

a) characteristic  $\bar{E}_z(\tau)$ ,

b) increase of characteristic  $\bar{E}_z(\tau)$  in region of  $\tau_0$  and straight line  $\bar{E}_z(\tau^*)$

Dla prostej:

$$\bar{\tau}(E_z^*) = d_0 + d_1 \cdot E_z^*, \quad (11)$$

do oceny wyniku pomiaru wykorzystuje się wyrażenie:

$$\hat{\phi} = -\omega \hat{\tau}_0 = -\omega \bar{\tau}(E_z^*) = -\omega \cdot \hat{d}_0. \quad (12)$$

Do oceny wariancji można wykorzystać ogólną zależność:

$$S_{\bar{\tau}}^2(E_{zi}) = S^2 \left( \frac{1}{N} + \frac{(E_{zi} - \bar{E}_z)^2}{\sum_{i=1}^N (E_{zi} - \bar{E}_z)^2} \right), \quad (13)$$

gdzie:  $S$  – miara odchylenia poszczególnych wartości  $\tau$  od linii regresji:

$$S^2 = \frac{\sigma_n^2 (1-r^2)}{M (A_y \omega)^2} = \frac{\sigma_n^2}{(A_y \omega)^2} \frac{(1-r^2)}{M}, \quad (14)$$

$r$  – współczynnik korelacji, obliczony dla  $N$  punktów ( $E_{zi}$ ,  $\tau_i$ ).

Dla  $E_{zi} = \bar{E}_z \approx 0$ :

$$S_{\bar{\tau}}^2(0) = [S_{\bar{\tau}}^2]_{\min} = S_{\tau_0}^2 = \frac{\sigma_n^2}{(A_y \omega)^2} \frac{(1-r^2)}{N \cdot M}. \quad (15)$$

Zaproponowana metoda pomiaru umożliwia zmniejszenie wariancji estymatora czasu  $\tau_0$ , który jest proporcjonalny do poszukiwanego kąta przesunięcia fazowego  $\phi$ . Następuje  $2 \frac{(1-r^2)}{N \cdot M}$  krotne zmniejszenie wariancji estymatora czasu  $\tau_0$  w stosunku do klasycznego pomiaru z uwzględnieniem jednego okresu, natomiast  $2 \frac{(1-r^2)}{N}$  krotne w stosunku do klasycznego pomiaru z uśrednieniem jednopunktowym w  $M$  okresach.

Dla wystarczająco dużych wartości  $N$ , dla rozkładu normalnego, przyjmując współczynniki rozszerzenia  $k_r(\alpha)$  dla zadanego poziomu ufności  $\alpha$ , wynik pomiaru można przedstawić przedziałem ufności:

$$P(-\omega \cdot \hat{d}_0 - \omega \cdot k_r(\alpha) \cdot S_{\tau_0} < \hat{\phi} < -\omega \cdot \hat{d}_0 + \omega \cdot k_r(\alpha) \cdot S_{\tau_0}) = \alpha. \quad (16)$$

## 6. Podsumowanie

W zakresie elektrycznych pomiarów kąta przesunięcia fazowego, badania rozwojowe dotyczą przede wszystkim:

- zwiększenia szybkości pomiaru w pomiarach zmiennego w czasie kąta przesunięcia fazowego [2, 11], a także w sytuacjach pomiarów statycznych, gdy proces trwa długo ze względu na infraniskie częstotliwości stosowanych sygnałów [1],
- zwiększenia dokładności pomiarów, zarówno statycznych jak i dynamicznych, szczególnie ze względu na wpływ sygnałów zakłócających;
- zwiększenia szybkości i dokładności pomiarów w sytuacjach, gdy jest to możliwe [5, 9],
- zapewnienia możliwie szerokiego zakresu pomiarowego w przedziale wartości kąta przesunięcia fazowego od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

Znane, wprowadzane w wyniku badań rozwojowych, metody pomiaru nie mają charakteru uniwersalnego, zapewniającego poprawę wszystkich parametrów metrologicznych. W zakresie poprawy parametrów, metody wzajemnie się uzupełniają.

W pomiarach kąta przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych zakłóconych, w klasycznych metodach uśredniania jednopunktowego można uzyskać jedną, mało dokładną wartość kąta przesunięcia fazowego, na podstawie jednego okresu przebiegu

wejściowego. Uzyskanie poprawy dokładności wyniku (zmniejszenie wariancji) wymaga uśredniania wyników pomiarów z wielu okresów, a co za tym idzie wydłużenia czasu pomiaru.

Wyniki symulacji komputerowych oraz pomiarów wykazały poprawę dokładności estymacji wartości kąta przesunięcia fazowego metodą warunkowego uśredniania sygnałów, w porównaniu z wynikami uzyskanymi metodą korelacyjną oraz metodą klasyczną dla wybranych, analizowanych sytuacji pomiarowych. Ponadto, stosując proponowaną metodę pomiaru wykorzystującą warunkowe uśrednianie wartości chwilowych sygnałów, można uzyskać zbliżoną dokładność pomiaru kąta przesunięcia fazowego w czasie krótszym niż w metodzie uśredniania jednopunktowego w czasie obejmującym wiele okresów.

Metoda wykorzystująca algorytm wielopunktowy daje korzystne wyniki dla pojedynczego okresu, przy założeniu zakłóceń szumem  $N(0, \sigma_n)$  szerokopasmowym o charakterze addytywnym. Dla innych modeli zakłóceń (szum dolnopasmowy, składowe sinusoidalne o niskich częstotliwościach, zakłócenia multiplikatywne itp.) metoda jest mniej przydatna (ze względu na dużą wariancję wyniku pomiaru). W takich sytuacjach, korzystne jest zastosowanie najpierw warunkowego uśredniania zniekształconych realizacji sygnału, a następnie wyznaczenie prostej regresji, parametrów prostej regresji i poszukiwanej wartości kąta przesunięcia fazowego  $\phi$ , korzystając z prezentowanej II zasady pomiaru (algorytm 1).

## 7. Literatura

- [1] Cichy A.: „Pomiar przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych o częstotliwościach infraniskich (10-3-10)Hz”. Praca doktorska; Gliwice 1998.
- [2] Gajda J., Sroka R.: „Pomiary kąta fazowego. Modele – układy – algorytmy”. Kraków 2000.
- [3] Sroka R., Stencel M.: „Pomiar zmiennego w czasie kąta fazowego metodą aproksymacyjną – badania symulacyjne”. VI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Materiały konferencyjne str. 219 – 227, Krynica 1996r.
- [4] Szlachta A.: „Conditional averaging of a delayed signal module in measurements of the phase shift of sinusoidally noised voltages”. 5th International Conference on Measurement MEASUREMENT 2005, pp.101-104, Smolenice, SLOVAKIA 2005.
- [5] Szlachta A., Kowalczyk A.: „Modelowanie warunkowego uśredniania wartości amplitudowych sygnałów w pomiarach przesunięcia fazowego”. XIV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica 19 – 23 września 2004r.
- [6] Szlachta A.: „Porównanie wybranych parametrów fazomierzy elektronicznych”. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 207, Seria Elektrotechnika, zeszyt 25, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, str. 295-300; Rzeszów 2003.
- [7] Szlachta A., Kowalczyk A.: „Sygnały stosowane w modelowaniu zasady pomiaru kąta przesunięcia fazowego przy występowaniu zakłóceń”. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 220; Seria Elektrotechnika, zeszyt 27, str. 185 – 192, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- [8] Szlachta A.: „Zastosowanie modułu sygnału opóźnionego w modelowaniu pomiarów kąta przesunięcia fazowego”. XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica 18 – 22 września 2005r.
- [9] Szlachta A.: „Zastosowanie warunkowego uśredniania wartości amplitudowych sygnałów w pomiarach kąta przesunięcia fazowego”. Rozprawa doktorska; Rzeszów 2006.
- [10] Wagdy M.F., Lucas M.S.P.: „Errors in Sampled Data Phase Measurement”. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 34, IM- 34, nr 4, pp 507-509, December, 1985.
- [11] Zieliński T. P.: „Metody estymacji chwilowego przesunięcia fazowego: Część II: Porównanie własności użytkowych”. V Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Materiały konferencyjne str. 88 – 100, Krynica 1995r.
- [12] Спектор С.А.: „Электрические измерения физических величин”. ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ Ленинградское отделение, Ленинград 1987.