

Wpływ zniekształceń i zakłóceń harmonicznych na dokładność fazomierza regresyjnego

Streszczenie. W artykule przedstawiono charakterystyki warunkowych wartości średnich w zastosowaniu do pomiaru kąta przesunięcia fazowego pomiędzy dwoma sygnałami sinusoidalnymi o tej samej częstotliwości. Omówiono wpływ zniekształceń i zakłóceń harmonicznych na dokładność pomiaru. Podano przykłady eksperymentalne oraz podsumowanie.

Abstract. The article presents the characteristics of the conditional average values used to measure the phase shift angle between two sinusoidal signals of the same frequency. The impact of interferences and harmonic distortions on measurement accuracy was discussed. Examples of experiments and a summary were provided. (**Impact of interferences and harmonic distortions on the accuracy of a regression phase meter**)

Słowa kluczowe: przesunięcie fazowe, zakłócenia harmoniczne, warunkowa wartość średnia, niepewność standardowa.

Keywords: phase shift, harmonic distortions, conditional average value, standard uncertainty.

Wstęp

Pomiar kąta przesunięcia fazowego pomiędzy dwoma sygnałami sinusoidalnymi o tej samej częstotliwości jest stosowany przy badaniu różnego rodzaju obiektów elektrotechnicznych i elektronicznych. Niedokładności w pomiarach kąta przesunięcia fazowego najczęściej wynikają z występowania w sygnałach szumu, składowych harmonicznych oraz składowych stałych [1-4].

Metody pomiaru wykorzystujące przetwarzanie wartości przesunięcia fazowego w interwał czasu wykorzystują informację o różnicy faz na podstawie tylko dwóch wartości sygnałów w ich realizacji czasowej. Taki sposób pomiaru nie eliminuje wpływu na wynik pomiaru zakłóceń o charakterze losowym a także zniekształceń analizowanych sygnałów sinusoidalnych.

Dla sygnałów okresowych zakłóconych poprawę stosunku sygnału do szumu i wyodrębnienie z szumu sygnału użytecznego, a także ocenę jego parametrów można uzyskać stosując integralne statystyczne metody przetwarzania sygnałów, w szczególności techniki korelacyjne i uśrednianie sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz algorytmy aproksymacyjne [5-8]. Jednym ze stosowanych w tym obszarze metrologii kierunków badawczych i aplikacyjnych jest zastosowanie modeli regresyjnych i warunkowego uśredniania sygnałów [9-14]. W niniejszym artykule przedstawiono wpływ zniekształceń i zakłóceń harmonicznych na dokładność fazomierza regresyjnego.

Warunkowe charakterystyki sygnału przesuniętego w fazie

W modelu ogólnym amplitudy sygnałów sinusoidalnych są stałe a wspólna faza początkowa sygnałów ma rozkład równomierny w przedziale $[-\pi, \pi]$. Zakłada się, że sygnał sinusoidalny pierwotny $x(t)$ jest pozbawiony zniekształceń, natomiast opóźniony sygnał wtórny $y(t)$ jest zakłócony stacjonarnie i addytywnie składowymi harmonicznymi $s(t)$. Taka sytuacja może występować w aktywnych eksperymentach pomiaru przesunięcia fazowego. Sygnałem dostępnym w analizie jest sygnał $z(t)=y(t)+s(t)$. Uwzględnia się wartości sygnałów w chwilach t_1 i t_2 ($\tau=t_2-t_1$).

Do opisu przetwarzania sygnałów wprowadza się oznaczenia:

$$(1) \quad x_1 = x(t_1) = X_1 \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \varphi),$$

$$(2) \quad y_1 = y(t_1) = Y_1 \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \varphi + \varphi_{xy}),$$

$$(3) \quad \begin{aligned} y_2 &= y(t_1 + \tau) = y(t_2) = \\ &= Y_1 \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \omega \cdot \tau + \varphi + \varphi_{xy}), \end{aligned}$$

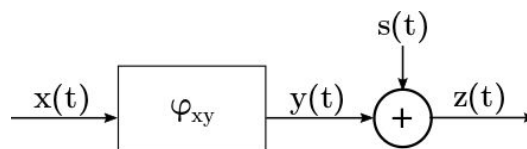
gdzie: ω – pulsacja podstawowej harmonicznej, φ – początkowa wspólna dla $x(t)$ i $y(t)$ przypadkowa faza z gęstością prawdopodobieństwa $p(\varphi) = \frac{1}{2\pi}$, φ_{xy} – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem wejściowym $x(t)$ i sygnałem wyjściowym $y(t)$.

Do analizy dostępna jest suma $z(t)$ sygnału opóźnionego $y(t)$ i zakłócenia wyższymi harmonicznymi $s(t)$ (rys.1). Dla czasu t_2 :

$$(4) \quad z_2 = z(t_2) = y(t_2) + s(t_2),$$

$$(5) \quad s(t_2) = \sum_{i=2}^n Y_i \cos(\omega_i \cdot t_2 + \varphi_i).$$

Składowe harmoniczne zakłócenia $s(t)$, o pulsacjach ω_i , mogą być powiązane z sygnałem opóźnionym $y(t)$ warunkiem zgodnych faz początkowych φ_i lub mogą być nie powiązane i posiadać przypadkowe fazy początkowe φ_{in} o rozkładzie równomiernym w przedziale $[-\pi, \pi]$.



Rys. 1. Model przetwarzania sygnałów w pomiarze przesunięcia fazowego

Dla modelu zdeterminowanego związku między sygnałami $x(t)$ i $y(t)$ oraz przy braku zakłócenia $s(t)$ słuszna jest zależność:

$$(6) \quad z(t_2) = y(t_2) = Y_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \varphi_{xy} \pm \arccos \frac{x_1}{X_1}\right),$$

Funkcja regresji dla sygnałów $x(t)$ i $y(t)$ jest rozwinięciem w dziedzinie wartości warunkowej wartości oczekiwanej $E[y|x] = f_1(x)$. Dla przyjętego warunku $x(t) = x_p$ oraz zadawanego przesunięcia czasowego τ pomiędzy sygnałami $x(t)$ i $y(t)$ otrzymuje się charakterystykę stochastyczną $E[y|x_p] = f_2(\tau)$ w dziedzinie czasu. Przy

zdeterninowanej zależności funkcyjnej (6), warunkowa wartość oczekiwana i warunkowa średnia arytmetyczna z wielu warunkowych realizacji są równe pojedynczej warunkowej realizacji.

W przedziale $0 \div \pi$ dla warunków w: $x(t_1)=0$ i $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x(t_1)} < 0$

warunkowa zależność dla rozwinięcia realizacji sygnału opóźnionego w czasie $y|_w(\tau)$ z początkiem obserwacji $t_r=0$ jest jednoznaczna:

$$(7) \quad \begin{aligned} y|_w(\tau) &= Y_1 \cos\left(\omega \cdot \tau + \varphi_{xy} + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= -Y_1 \sin(\omega \cdot \tau + \varphi_{xy}) \end{aligned}$$

Dla $\tau=0$ obliczony dla podstawowej harmonicznej kąt przesunięcia fazowego wynosi:

$$(8) \quad \varphi_{xy} = -\arcsin \frac{y|_w(0)}{Y_1}$$

Gdy zakłóceniem są stacjonarnie związane wyższe harmoniczne sygnału opóźnionego to warunkowa zależność dostępczej okresowej sumy $z|_w(\tau)$ jako przybliżenia $y|_w(\tau)$ wynosi:

$$(9) \quad \begin{aligned} z|_w(\tau) &= -Y_1 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi_{xy}) - \\ &- \sum_{n=2}^{\infty} Y_N \cdot \sin(\omega \cdot \tau + n \cdot \varphi_{xy}) \end{aligned}$$

Przebieg $z|_w(\tau)$ jest warunkowym rozwinięciem w czasie zniekształconego sygnału okresowego z obserwowaną amplitudą Y_1^* .

W oparciu o dostępne dane z eksperymentu: $z|_w(\tau)$, która jest przybliżoną oceną $y|_w(\tau)$ i Y_1^* jako oceny Y_1 , dla $\tau=0$ ocena kąta φ_{xy}^* wynosi:

$$(10) \quad \begin{aligned} \varphi_{xy}^* &= -\arcsin \frac{z|_w(0)}{Y_1^*} = \\ &= -\arcsin \left[\frac{Y_1 \cdot \sin \varphi_{xy} + \sum_{n=2}^{\infty} Y_N \cdot \sin \varphi_{yn}}{Y_1^*} \right] = \\ &= -\arcsin \left[k_1 \sin \varphi_{xy} + k_2 \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \sin n \cdot \varphi_{xy} \right], \end{aligned}$$

gdzie: Y_1^* - ocena amplitudy Y_1 ; $k_1 = \frac{Y_1}{Y_1^*}$; $k_2 = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} Y_N}{Y_1^*}$.

Błąd bezwzględny w ocenie wartości przesunięcia fazowego wynosi:

$$(11) \quad \Delta \varphi_{xy} = \varphi_{xy}^* - \varphi_{xy}$$

Należy zauważyć, że w modelu Fouriera sygnałów okresowych można związać warunek przejścia przez zero dla sygnału odkształconego z warunkiem dla jego pierwszej harmonicznej. Oznacza to, że przy zakłóconym centrowanym sygnale wtórnym wybranym do inicjacji uśredniania, warunkowa wartość czysto sinusoidalnego sygnału pierwotnego z amplitudą X_1 pozwala na dokładną ocenę przesunięcia fazowego z uwzględnieniem jego znaku:

$$(12) \quad \varphi_{yx} = -\arcsin \frac{x|_w(0)}{X_1},$$

gdzie: $x|_w(0)$ oznacza wartość sygnału pierwotnego dla momentu czasowego, w którym sygnał wtórny zniekształcony przechodzi przez poziom zerowy z założonym znakiem pochodnej.

Jeżeli sygnał opóźniony $y(t)$ jest zakłócony sygnałem harmonicznym $s(t)$ z przypadkową fazą początkową φ_p (model quasideterminowany) to wyznaczenie charakterystyki pomiarowej, którą jest warunkowa wartość oczekiwana $E(z|_{x=0})$ wymaga obliczenia warunkowej gęstości prawdopodobieństwa $p(z|_{x=0})$.

Dla warunku $x(t)=0$ osiąganego w przedziale $(0-2\pi)$ kolejno z ujemną i dodatnią wartością pochodnej gęstości prawdopodobieństwa dla sygnału opóźnionego $y(t)$ wynoszą:

$$(13) \quad p_1(y|_{x=0}) = \delta \left[y - Y_1 \cdot \cos \left(\omega \cdot \tau + \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

$$(14) \quad p_2(y|_{x=0}) = \delta \left[y - Y_1 \cdot \cos \left(\omega \cdot \tau + \frac{3}{2} \cdot \pi \right) \right],$$

gdzie: $\delta[\]$ – delta Diraca.

Przy założeniu oddziaływania addytywnego niezależnego harmonicznego sygnału zakłócającego $s(t)$ warunkowa gęstość prawdopodobieństwa dla zakłócenia nie zależy od warunku i wynosi:

$$(15) \quad p(s|_{x=0}) = p_s(s).$$

Mając zależności warunkowych funkcji gęstości prawdopodobieństwa (13) i (15) przy warunku $x=0$ w przedziale $(0 \div \pi)$ można wyznaczyć warunkową gęstość prawdopodobieństwa przebiegu $z(t)$. Dla sumy sygnałów (4) z uwzględnieniem zależności (13) gęstość prawdopodobieństwa wyraża splot funkcji:

$$(16) \quad p_{z|_w}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(y|_{x=0}) \cdot p_s(z-y) dy.$$

Na podstawie właściwości splotu funkcji $p_s(z-y)$ z delta Diraca można przekształcić wyrażenie (16) i otrzymać warunkową gęstość prawdopodobieństwa:

$$(17) \quad \begin{aligned} p_{z|_w}(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta \left[y - Y_1 \cdot \cos \left(\omega \cdot \tau + \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot \\ &\cdot p_s(z-y) dy = p_s \left(z - Y_1 \cdot \cos \omega \tau + \varphi + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Warunkowa wartość oczekiwana sumy $z|_w(\tau)$ po podstawieniu (17) i obliczeniach:

$$\begin{aligned}
 E[z|_w] &= \int_{-\infty}^{\infty} z \cdot p_{z|_w}(z) dz = \\
 (18) \quad &= Y_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \\
 &= -Y_1 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi).
 \end{aligned}$$

Przy uwzględnieniu gęstości prawdopodobieństwa (14) dla warunku $x=0$ w przedziale $(\pi, 2\pi)$ i wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymuje się wyrażenie dla warunkowej wartości oczekiwanej:

$$\begin{aligned}
 (19) \quad E[z|_w] &= Y_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \varphi + \frac{3\pi}{2}\right) = \\
 &= Y_1 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi).
 \end{aligned}$$

W praktyce dobrym i optymalnym estymatorem warunkowej wartości oczekiwanej $E[z|_w]$ jest średnia arytmetyczna $\bar{z}|_w$.

W celu wyznaczenia statystycznej wartości estymaty $\hat{\varphi}_{xy}$ kąta przesunięcia fazowego należy obliczyć funkcję arcus sinus z ilorazu warunkowej wartości średniej arytmetycznej zakłóconej realizacji $z(t)$ i estymaty \hat{Y}_1 amplitudy sygnału przesuniętego o kąt φ_{xy} :

$$\begin{aligned}
 (20) \quad \hat{\varphi}_{xy} &= -\arcsin\left(\frac{\hat{E}[z|_w]}{\hat{Y}_1}\right) = -\arcsin\frac{\hat{E}_z}{\hat{Y}_1} = \\
 &= -\arcsin\frac{\bar{z}|_w}{\bar{Y}_1} = -\arcsin\frac{\bar{z}|_w}{\bar{Y}_1},
 \end{aligned}$$

gdzie: $\hat{E}_z = \bar{z}|_w$ – warunkowa wartość średniej arytmetycznej jako ocena eksperymentalna wartości oczekiwanej zakłóconego sygnału $y(t)$ przesuniętego o kąt φ_{xy} względem sygnału $x(t)$ dla warunku $x(t)=0$, \bar{Y}_1 – wartość średniej arytmetycznej jako ocena eksperymentalna amplitudy Y_1 sygnału opóźnionego $y(t)$.

Przy pojedynczym sinusoidalnym addytywnym zakłóceniu $s(t)$ z przypadkową fazą początkową dla oceny niepewności standardowej $u_{\hat{\varphi}_{xy}}$ można wykorzystać zależność:

$$\begin{aligned}
 (21) \quad u_{\hat{\varphi}_{xy}} &= \left| \frac{d\hat{\varphi}_{xy}}{d\left(\frac{\hat{E}_z}{\hat{Y}_1}\right)} \right| u_{\frac{\hat{E}_z}{\hat{Y}_1}} = \frac{u_{\frac{\hat{E}_z}{\hat{Y}_1}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\hat{E}_z}{\hat{Y}_1}\right)^2}} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{2}}}{\sqrt{M Y_1} \sqrt{1 - \left(\frac{\hat{E}_z}{\hat{Y}_1}\right)^2}} = \\
 &= \frac{U_s}{\sqrt{2 M Y_1} \cos \hat{\varphi}_{xy}}.
 \end{aligned}$$

Zależność (21) jest słuszna dla założenia, że amplituda Y_1 jest stała i znana.

Charakterystyka niepewności $u_{\hat{\varphi}_{xy}}$ pokazuje, że duże niepewności pomiaru występują w pobliżu punktów $\varphi_{xy} = \pm 90^\circ$ a minimalna wartość dla $\varphi_{xy} = 0$ wynosi:

$$(22) \quad \left(u_{\hat{\varphi}_{xy}}\right)_{\min} = \frac{U_s}{\sqrt{2 M Y_1}}.$$

Jeżeli zakłócenie $s(t)$ jest sumą harmonicznymi z przypadkowymi fazami początkowymi φ_i to rozkład prawdopodobieństwa $p_s(s)$ przybliża się do modelu normalnego. Normalizacja następuje zgodnie z warunkami

centralnego twierdzenia granicznego przy dostatecznie dużej liczbie skoncentrowanych w otoczeniu zera harmonicznymi.

Przykłady eksperymentalne

Przykład 1

W eksperymencie w obiekcie technicznym były badane sygnały okresowe o częstotliwości $f_x = 1,0568$ kHz. Sygnałem pierwotnym jest sygnał sinusoidalny $x(t)$ a sygnałem przesuniętym w czasie i mocno zakłóconym jest sygnał $z(t)$ o kształcie trójkątnym. Na rysunku 2a przedstawiono przebiegi sygnałów w procesie warunkowego uśredniania.

Obliczenie przesunięcia fazowego pierwszej harmonicznnej z zależności (10) wynosi:

$$\varphi_{xy}^* = -\arcsin\frac{z|_w(0)}{Y_1^*} = -\arcsin\frac{-1,8V}{5,2V} = 20,25^\circ,$$

gdzie: Y_1^* – amplituda sygnału $z(t)$.

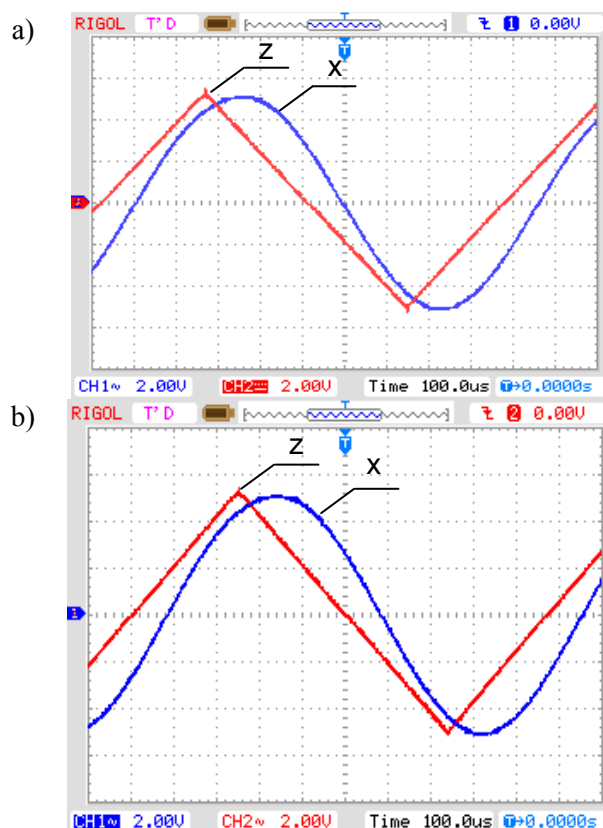
W eksperymencie przy zastosowaniu eliminacji wyższych harmonicznymi z sygnału $z(t)$ fazomierzem SD1000 poprawna ocena przesunięcia:

$$\varphi_{xy} = 31,4^\circ.$$

Błąd bezwzględny oceny φ_{xy} :

$$\Delta\varphi_{xy} = 20,25^\circ - 31,4^\circ = -11,15^\circ.$$

Bardzo duża wartość błędu bezwzględnego przy tym sposobie oceny φ_{xy} wynika z dużego trwałego zniekształcenia sygnału wtórnego zawierającego podstawową harmoniczną. Jest oczywiste, że w sytuacji dużych zniekształceń sygnału opóźnionego taka zasada pomiaru nie powinna być stosowana.



Rys. 2. Sygnały przesunięte w czasie: a). inicjacja rejestracji sygnałem pierwotnym $x(t)$; b). inicjacja rejestracji sygnałem opóźnionym $y(t)$

Dysponując pierwotnym sygnałem bez zniekształceń jak na rysunku 2b można inicjować rejestrację wtórnym sygnałem odkształconym. Obliczone przesunięcie pierwszej harmonicznej:

$$\varphi_{yx}^* = -\arcsin \frac{x|_w(0)}{X_1} = -\arcsin \frac{2,6V}{5V} = -31,3^\circ.$$

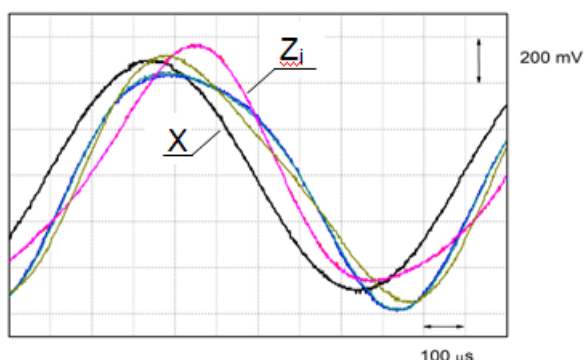
W porównaniu z wartością przyjętą za poprawną błąd bezwzględny wynosi:

$$\Delta\varphi_{xy} = -\varphi_{yx}^* - \varphi_{xy} = 31,3^\circ - 31,4^\circ = -0,1^\circ.$$

Przy tym sposobie pomiaru następuje duży wzrost dokładności wyniku.

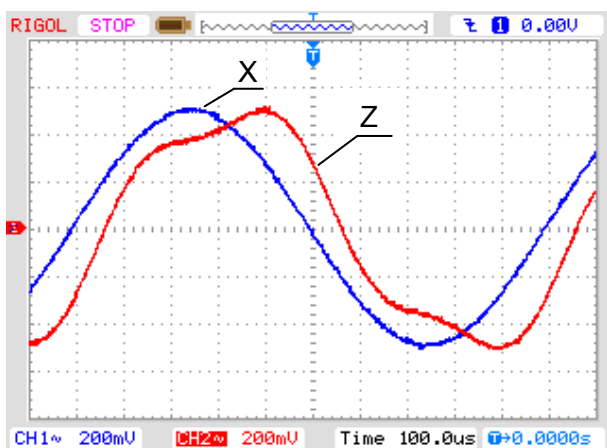
Przykład 2

Sygnałem pierwotnym $x(t)$ jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f_x = 1,0004 \text{ kHz}$ a sygnałem przesuniętym w fazie w układzie inercyjnym RC jest sygnał $y(t)$, który jest zakłócony addytywnie przebiegiem sinusoidalnym z przypadkową fazą początkową względem fazy sygnałów $x(t)$ i $y(t)$.



Rys. 3. Realizacje sygnału opóźnionego $y(t)$ zakłóconego addytywnie sinusoidą $U_s = 100 \text{ mV}$; $f_s = 2 \text{ kHz}$

Rysunek 3 przedstawia zbiór realizacji sygnału $y(t)$ zakłóconych addytywnie sinusoidą $U_s = 100 \text{ mV}$; $f_s = 2 \text{ kHz}$. Sygnał sinusoidalny z przypadkową fazą początkową zakłóca kolejne realizacje ze stałym przesunięciem fazowym φ_{xy} .

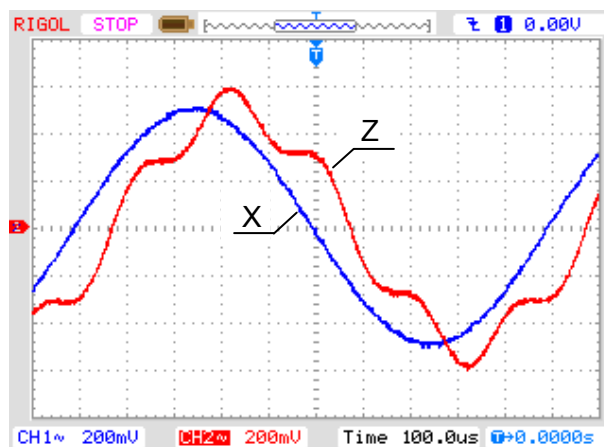


Rys. 4. Sygnał opóźniony $y(t)$ zakłócony addytywnie sinusoidą $U_s = 100 \text{ mV}$; $f_s = 3 \text{ kHz}$

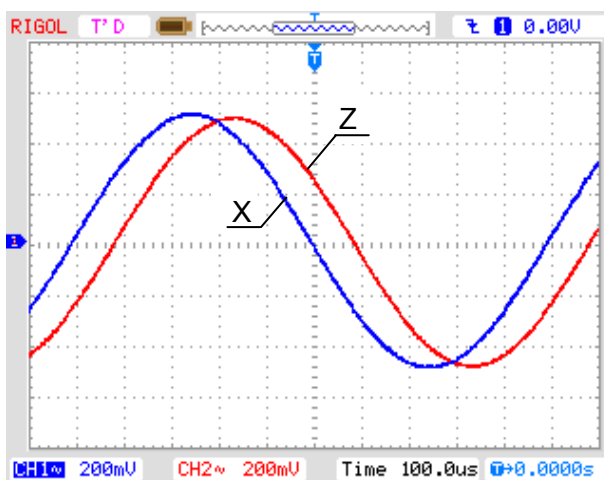
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono sygnały opóźnione z dużymi addytywnymi zakłóceniami sygnałami sinusoidalnymi z przypadkową fazą początkową. Widoczny jest duży poziom zniekształceń sygnału opóźnionego. Rysunek 6 obrazuje sygnały $x(t)$ i $z(t)$ z zakłóceniem jak na

rys.5 po operacji warunkowego uśredniania dla $M=256$ uśrednień. Nastąpiła eliminacja zakłóceń w sygnale opóźnionym. Ocena przesunięcia fazowego dla pierwszej harmonicznej wynosi:

$$\hat{\varphi}_{xy} = -\arcsin \frac{z|_w}{Y_1} = -\arcsin \frac{260 \text{ mV}}{500 \text{ mV}} = -31,3^\circ.$$



Rys. 5. Sygnał opóźniony $y(t)$ zakłócony addytywnie sinusoidą $U_s = 100 \text{ mV}$; $f_s = 5 \text{ kHz}$



Rys. 6. Sygnały $x(t)$ i $z(t)$ poddane operacji warunkowego uśredniania ($n=256$ uśrednień); $U_s = 100 \text{ mV}$; $f_s = 5 \text{ kHz}$

Obliczone przesunięcie fazowe dla $RC = 10^{-4} \text{ s}$ z zależności:

$$\varphi_{xy} = \arctg(-\omega RC) = -32,4^\circ,$$

a wyznaczone fazomierzem SD1000 ma wartość $\hat{\varphi}_{xy} = -32,2^\circ$.

Dla danych w eksperymencie warunkowego uśredniania: $Y_1 = 500 \text{ mV}$; $U_s = 100 \text{ mV}$; $f_s = 5 \text{ kHz}$; $M = 256$; $\cos \hat{\varphi}_{xy} = 0,85$ - obliczona na podstawie (21) wartość niepewności $u_{\hat{\varphi}_{xy}} [\%] = 1,04\%$.

Podsumowanie

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

W warunkach występowania zakłóceń kąt przesunięcia fazowego określa się dla pierwszych harmonicznych analizowanych sygnałów. W pomiarach kąta przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych zakłóconych w klasycznych zasadach przetwarzania przesunięcia fazowego w interwał czasu wykorzystuje się informację o przesunięciu czasowym tylko dwóch wartości chwilowych sygnałów na podstawie jednego okresu ich przebiegów. Taka zasada pomiaru cechuje się małą odpornością na zakłócenia i dużą zależnością wyniku pomiaru od zmiany kształtu sygnałów wejściowych. Uzyskanie poprawy dokładności wyniku (zmniejszenie wariancji) wymaga uśrednienia wyróżnionych dwóch wartości wyników pomiarów z wielu okresów.

Bardziej pełne informacje i poprawę dokładności pomiaru przesunięcia fazowego można uzyskać stosując integralne zasady pomiaru. Jedną z takich zasad jest zastosowanie algorytmu „arcus sinus”. Algorytm „arcus sinus” do wyznaczania kąta φ_{xy} wykorzystuje, przy warunku $\tau=0$, funkcje odwrotne zależności sinusoidalnych (7, 18 i 19). Przy zakłóceniach nieskorelowanych charakterystykę warunkowej wartości średniej $E[z|_w]$ opisaną podanymi wzorami można zastosować do wyznaczania wartości kąta przesunięcia fazowego, wyznaczając średnią arytmetyczną opóźnionego i zakłóconego sygnału $z(t)$ odpowiadającą momentowi przejścia sygnału $x(t)$ przez poziom zerowy z przyjętą (ujemną lub dodatnią) pochodną.

Niepewność pomiaru kąta φ_{xy} osiąga duże wartości dla kątów $\pm \frac{\pi}{2}$ i minimalną wartość dla $\varphi_{xy}=0$. Charakterystyka niepewności pokazuje uzupełniające właściwości omawianej zasady pomiaru w stosunku do zasady korelacyjnej, gdzie duże niepewności pomiaru występują w pobliżu punktów $\varphi_{xy}=0$ i $\varphi_{xy}=\pi$ a minimalne wartości

$$\text{dla } \varphi_{xy} = \frac{\pi}{2}.$$

Przy zakłóceniach powiązanych funkcyjnie z sygnałem opóźnionym w modelu Fouriera, inicjację pomiaru można realizować sygnałem odkształconym a ocenę kąta przesunięcia fazowego otrzymuje się na podstawie zależności (12).

Prezentowana zasada pomiaru może znaleźć zastosowanie w praktyce przy szybkich ocenach przesunięcia fazowego podstawowej harmonicznej kiedy sygnał odpowiedzi układu fizycznego na wymuszenie sinusoidalne jest zniekształcony trwale lub losowo.

Autor: prof. dr hab. inż. Adam Kowalczyk, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: kowadam@prz.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Gajda J., Sroka R., Pomiar kąta fazowego. Modele – układy – algorytmy. Wyd. AGH, Kraków 2000
- [2] Piersol A.G.: Time delay estimation using phase data. *IEEE Transactions on ASSP*, vol. 29 (1981), no. 3, 471-477
- [3] Wagdy M.F., Lucas M.S.P., Errors in Sampled Data Phase Measurement, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 34, (1985) IM- 34, n. 4, 507-509
- [4] Micheletti R.: Phase-angle measurement between two sinusoidal signals. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol.40(1) (1991), 40-42
- [5] Bendat J.S., Piersol A.G.: Random data – analysis and measurement procedures. J. Wiley, New York 2000
- [6] Sroka R., Stencel M., Pomiar zmiennego w czasie kąta fazowego metodą aproksymacyjną – badania symulacyjne. *VI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Materiały konferencyjne*, 219 – 227, Krynica 1996r
- [7] Спектор С.А., Электрические измерения физических величин. ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ Ленинградское отделение, Ленинград 1987
- [8] Max J.: Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques, vol. 1, 2. Masson, Paris 1981
- [9] Szlachta A., Zastosowanie warunkowego uśredniania wartości amplitudowych sygnałów w pomiarach kąta przesunięcia fazowego. Rozprawa doktorska; Rzeszów 2006.
- [10] Szlachta A., Kowalczyk A.: Porównanie wybranych algorytmicznych metod pomiaru kąta przesunięcia fazowego. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53 (2007), nr 9/2007 bis, 177-180
- [11] Kowalczyk A., Szlachta A.: Algorithmic method for phase angle shift of noisy voltages using conditional averaging of delayed signal's absolute value. *Metrology and Measurement Systems*, vol. 18 (2011), no. 1, 137-144
- [12] Kowalczyk A.: Pomiarowe zastosowania warunkowego uśredniania sygnałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015.
- [13] Kowalczyk A., Szlachta A., Hanus R., Chorzępa R.: Estimation of conditional expected value for exponentially autocorrelated data. *Metrology and Measurement Systems*, vol. 24 (2017), n. 1, 69–78
- [14] Hanus R., Kowalczyk A., Szlachta A., Chorzępa R.: Application of conditional averaging to time delay estimation of random signals. *Measurement Science Review*, vol. 18 (2018), n. 4, 130-137.