

## **Sposób pomiaru kąta przesunięcia fazowego napięć w mostkowym przesuwniku fazy**

Przedmiotem wynalazku jest sposób pomiaru kąta przesunięcia fazowego napięć w mostkowym przesuwniku fazy.

Znane są sposoby pomiaru kąta przesunięcia fazy między przebiegami o jednakowej częstotliwości metodą przekształcenia w przedział czasowy, która polega na określeniu chwil czasu, w których sygnały przechodzą przez zero i wyznaczeniu ich różnicy.

Znane są metody oscyloskopowe takie jak metoda elipsy, która polega na pomiarze wymiarów elipsy. Znana jest również metoda kompensacyjna, która polega na skompensowaniu występującej różnicy faz do zera lub pełnego okresu wykorzystując kalibrowany przesuwnik fazowy.

Znana jest metoda pomiaru przesunięcia faz trzema woltomierzami, według której mierzy się wartości skuteczne napięć wyidukowanych w dwóch transformatorach, których strony wtórne są połączone w szereg oraz sumę lub różnicę geometryczną tych napięć. Z trójkąta utworzonego przez zmierzone napięcia na podstawie wzoru cosinusów oblicza się kąt przesunięcia fazowego.

Stosowanie tych metod w układach pomiarowych o wysokiej dokładności, w których nastawa i pomiar kąta fazowego są krytyczne dla aplikacji, nie daje zadowalających rezultatów z powodu kumulowania się błędów pomiaru parametrów, na podstawie których obliczany jest kąt przesunięcia fazowego. Błędy pomiaru są szczególnie duże w przypadku pomiaru kąta fazowego o wartości bliskiej  $\pi/2$ . Znane i opisane rozwiązania nie są odpowiednie w zastosowaniach do nastawiania i sprawdzania prostopadłości napięć przesuwników przeznaczonych do pomiarów precyzyjnych.

Znane są mostkowe układy przesuwnika fazy, opisane np. w książce Mariana Łapińskiego „Miernictwo teleelektryczne”, t. 2, „Pomocniczy sprzęt pomiarowy”, (Wyd. WKiŁ, 1962), s. 60-67. Opisane układy wymagają zasilania dwoma

jednakowymi napięciami synfazowymi połączonymi szeregowo zgodnie a warunkiem poprawnego działania jest brak obciążenia układu. Uniemożliwia to zastosowanie takich układów do pracy w precyzyjnych układach pomiarowych przy zmieniającym się obciążeniu.

Na te same ograniczenia mostkowych układów przesuwników fazy wskazuje także Jerzy Dudziewicz w książce „Pomiary teletransmisyjne” (Wyd. WKiŁ, 1984), s. 378-380.

Pozbawiony tych wad jest mostkowy układ do pomiaru kąta przesunięcia fazowego, a w szczególnym przypadku do sprawdzania prostopadłości napięć, w którym napięcia zasilania mogą mieć dowolne amplitudy i fazy oraz mierzone są ilorazy modułów lub wartości skutecznych napięć, a nie wartości poszczególnych napięć. Sposób według wynalazku umożliwia bardzo dokładny pomiar kąta przesunięcia fazowego, o zminimalizowanym wpływie zmian napięcia wejściowego, z uwzględnieniem nierówności napięć zasilających i obciążenia przesuwnika fazy. Przy zmieniającym się obciążeniu przesunięcie fazowe może być mierzone i korygowane na bieżąco.

Przedmiot wynalazku przedstawiono w poniższym przykładzie wykonania na rysunkach, na których Fig. 1 przedstawia schemat układu pomiarowego mostkowego przesuwnika fazy, a Fig. 2 przedstawia wykres wskazowy napięć przesuwnika w stanie gdy kąt  $\alpha$  spełnia relację:

$$0,5\pi \leq \alpha \leq \pi - \varphi \leq \pi.$$

Istota wynalazku polega na sposobie pomiaru kąta przesunięcia fazowego w mostkowym przesuwniku fazy, w którym dzielnik impedancyjny złożony z ramion rezystancyjnego ( $R$ ) i pojemnościowego ( $C$ ) jest zasilany z dwu źródeł napięcia połączonych szeregowo zgodnie, napięciem wejściowym przesuwnika jest napięcie  $V_{01}$  między początkiem wektora napięcia pierwszego źródła, a punktem połączenia jego końca z początkiem wektora napięcia drugiego źródła, napięciem wyjściowym  $V_{0P}$  jest napięcie między punktem połączenia źródeł, a punktem połączenia rezystancji  $R$  i pojemności  $C$  i charakteryzuje się tym, że mierzy się tylko ilorazy napięć ( $a, b, c, d, \vartheta_P$ ) takie, że  $a$  jest ilorazem określonej miary napięcia między punktem połączenia wektorów napięcia zasilania przesuwnika a końcem wektora

( $V_{o2}$ ) oraz między początkiem wektora ( $V_{o1}$ ) a punktem połączenia wektorów,  $b$  jest ilorazem tej samej miary napięć  $V_R$  na rezystancji  $R$  oraz  $V_{o1}$ ,  $c$  jest ilorazem tej samej miary napięć  $V_C$  na pojemności  $C$  oraz  $V_{o1}$ ,  $d$  jest ilorazem tej samej miary napięć  $V_{RC}$  na szeregowo połączonych rezystancji  $R$  i pojemności  $C$  oraz  $V_{o1}$ ,  $\vartheta_P$  jest ilorazem tej samej miary napięć  $V_{oP}$  na wyjściu przesuwника oraz  $V_{o1}$  a następnie wyznacza się cosinus kąta przesunięcia fazowego przesuwника mostkowego za pomocą równań liniowych. Ilorazy napięć ( $a, b, c, d, \vartheta_P$ ) mierzy się korzystnie za pomocą automatycznego systemu pomiarowego.

Cosinus kąta przesunięcia fazowego przesuwника mostkowego wyznacza się za pomocą równania:

$$\cos \alpha = \frac{1 + \vartheta_P^2 - b^2}{2\vartheta_P}.$$

Cosinus kąta przesunięcia fazowego przesuwника mostkowego wyznacza się za pomocą równania:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= -\cos(\gamma + \varphi) = \\ &= \frac{1}{4a^2\vartheta_P} \left[ \sqrt{[(a+c)^2 - \vartheta_P^2][\vartheta_P^2 - (c-a)^2][(a+1)^2 - d^2][d^2 - (1-a)^2]} \right. \\ &\quad \left. - (\vartheta_P^2 + a^2 - c^2)(d^2 - a^2 - 1) \right], \end{aligned}$$

Cosinus kąta przesunięcia fazowego przesuwника mostkowego wyznacza się za pomocą obydwu równań łącznie.

Zaletą rozwiązania według patentu jest obliczanie cosinusa kąta przesunięcia fazowego wyłącznie w oparciu o ilorazy wielkości mierzonych.

Obliczane wartości cosinusa kąta zależą tylko od ilorazów napięć, a nie od wartości napięć, więc pomiar jest bardzo odporny na wahania napięcia zasilania, a niezależność równań (12) i (13) pozwala na określenie stopnia spójności wykonanych pomiarów i zwiększenie dokładności nastawy kąta przesunięcia.

Sposób przedstawiono na fig 1 i 2 rysunków.

Sposób przedstawiono w przykładzie realizacji.

Przesuwnik mostkowy jest złożony z dwu szeregowo połączonych źródeł napięć przemiennych, transformatora o uzwojeniu wtórnym z odczepem dzielącym,

napięcie tego uzwojenia na dwie części  $\underline{V}_{o1}$  i  $\underline{V}_{o2}$ , o dowolnym współczynniku podziału, który może być wyrażony liczbą zespoloną, oraz z dzielnika impedancyjnego o ramionach: rezystancyjnym  $R$  i pojemnościowym  $C$ , dołączonego między początek i koniec uzwojenia wtórnego.

W układzie z transformatorem o dzielonym uzwojeniu wtórnym napięciem wyjściowym  $\underline{V}_{oP}$  przesuwnika jest napięcie między odczepem uzwojenia wtórnego transformatora a punktem połączenia rezystancji  $R$  i pojemności  $C$ . Jako kąt przesunięcia napięcia wyjściowego przesuwnika przyjęto kąt między napięciami  $\underline{V}_{o1}$  i  $\underline{V}_{oP}$ . Różnica kątów fazowych napięć  $\underline{V}_{o1}$  i  $\underline{V}_{oP}$  oznaczona jest przez  $\alpha$ , a kątów fazowych napięć  $\underline{V}_{o1}$  i  $\underline{V}_{o2}$  przez  $\varphi$ . Do wyjścia przesuwnika może być dołączona impedancja, co powoduje zmianę kąta przesunięcia przesuwnika. Kąt przesunięcia zależy także od pojemności wewnętrznych transformatora.

W układzie można zmierzyć np. wartości skuteczne napięć:  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$ ,  $V_{oP}$ ,  $V_R$ ,  $V_C$  oraz  $V_{RC}$ . Przyjmując  $V_{o1}$  jako napięcie odniesienia wprowadza się oznaczenia ilorazów:

$$a = \frac{V_{o2}}{V_{o1}}, \quad (1)$$

$$b = \frac{V_R}{V_{o1}}, \quad (2)$$

$$c = \frac{V_C}{V_{o1}}, \quad (3)$$

$$d = \frac{V_{RC}}{V_{o1}}, \quad (4)$$

$$\vartheta_P = \frac{V_{oP}}{V_{o1}}, \quad (5)$$

Współczynniki  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  oraz  $\vartheta_P$  są dodatnie. Współczynniki  $a$  i  $d$  zależą od ilorazu napięć zasilających przesuwnik, przy czym  $d$  zależy przede wszystkim od różnicy kątów fazowych napięć zasilających. Współczynniki  $b$  i  $c$  można zmieniać nastawami  $C$  oraz  $R$  dzielnika impedancyjnego, współczynnik zmiany amplitudy napięcia wyjściowego przesuwnika fazy  $\vartheta_P$  zależy silnie od obciążenia

przesuwnika. Jeżeli obciążenie zawiera np. składową indukcyjną, to w układzie może wystąpić rezonans, czego skutkiem są duże zmiany amplitudy napięcia wyjściowego i kąta przesunięcia napięcia wyjściowego względem napięcia  $V_{o1}$ .

Dla zmierzonych wartości skutecznych napięć tworzących trójkąty ADE, EDB oraz ADB (Fig. 2) obowiązują równania wynikające ze wzoru Carnota:

$$V_R^2 = V_{o1}^2 + V_{oP}^2 - 2V_{o1}V_{oP} \cos \alpha \quad (6)$$

$$V_C^2 = V_{oP}^2 + V_{o2}^2 - 2V_{o2}V_{oP} \cos \gamma \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{RC}^2 &= V_{o1}^2 + V_{o2}^2 - 2V_{o1}V_{o2} \cos(\pi - \varphi) \\ &= V_{o1}^2 + V_{o2}^2 + 2V_{o1}V_{o2} \cos \varphi \end{aligned} \quad (8)$$

Dzieląc równania (6), (7) i (8) przez  $V_{o1}^2$  i stosując przyjęte oznaczenia ilorazów otrzymuje się:

$$b^2 = 1 + \vartheta_p^2 - 2\vartheta_p \cos \alpha \quad (9)$$

$$c^2 = \vartheta_p^2 + a^2 - 2a\vartheta_p \cos \gamma \quad (10)$$

$$d^2 = 1 + a^2 + 2a \cos \varphi \quad (11)$$

Wartość  $\cos \alpha$  wyznacza się bezpośrednio z równania (9):

$$\cos \alpha = \frac{1 + \vartheta_p^2 - b^2}{2\vartheta_p} \quad (12)$$

Ponieważ  $\alpha = \pi - \gamma - \varphi$ , zatem  $\cos \alpha$  wyznacza się także z równań (10) i (11):

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= -\cos(\gamma + \varphi) = \\ &= \frac{1}{4a^2\vartheta_p} \left[ \sqrt{[(a+c)^2 - \vartheta_p^2][\vartheta_p^2 - (c-a)^2][(a+1)^2 - d^2][d^2 - (1-a)^2]} \right. \\ &\quad \left. - (\vartheta_p^2 + a^2 - c^2)(d^2 - a^2 - 1) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Przy założeniach stosowanych zwykle w praktyce, takich jak osiągnięte przesunięcie fazowe równe  $\pi/2$ , brak wpływu obciążenia na kąt przesunięcia fazowego, synfazowość napięć zasilających i równość ich amplitud, równania (12) i (13) upraszczają się do postaci znanej z literatury dla przypadków wyidealizowanych.

Wartości ilorazów napięć mogą być zmierzone bezpośrednio w bardzo krótkim czasie w automatycznym systemie pomiarowym, co minimalizuje wpływ zmian wartości napięcia zasilania przesuwnika na obliczane wartości  $\cos \alpha$ . Jeżeli w takim układzie wykorzystywany jest ten sam przetwornik napięć, to ilorazy napięć są mierzone dokładniej niż poszczególne napięcia.

W automatycznym systemie pomiarowo-sterującym z przesuwnikiem mostkowym ze zmieniającym się obciążeniem nastawianie kąta przesunięcia fazy polega na bieżącym korygowaniu wartości pojemności  $C$  i ewentualnie rezystancji  $R$  i sprawdzaniu wartości  $\cos \alpha$ , aż do osiągnięcia wartości założonej.

Opisany sposób jest realizowalny praktycznie, ponieważ wymaga pomiarów wykonywanych tylko w dostępnych punktach połączeń elementów układu. Sposób nadaje się do automatycznego korygowania odchylenia fazy od zadanej wartości kąta w przesuwnikach mostkowych oraz do precyzyjnych układów pomiarowych składowych impedancji.

$\cos \alpha$  może być obliczany alternatywnie z równania (12) albo (13), a także mogą być tworzone z tych wartości dokładniejsze miary, ponieważ obie wartości są obliczane na podstawie różnych funkcji, niezależnych od siebie liniowo. Różnica wartości  $\cos \alpha$  obliczona z wyników równań (12) i (13) jest miarą spójności wyników pomiarów używanych do obliczeń  $\cos \alpha$ .

