ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991
Seria: ELEKTRYKA z. 119 Nr kol. 1104

Andrzej MET
Marian KAMPIK

PRZESUWNIK FAZOWY O PRZESUNIĘCIU FAZY NIEZALEŻNYM OD CZĘSTOTLIWOŚCI

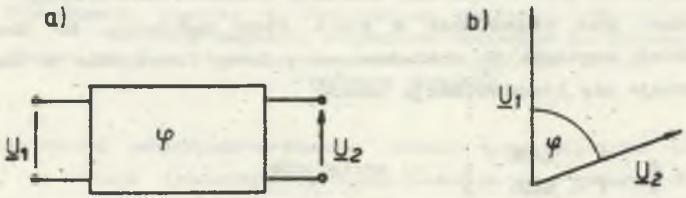
Streszczenie. W artykule przedstawiono układy dotychczas stosowanych przesuwników fazowych oraz ich właściwości. Zaproponowano układ przesuwnika fazowego, którego moduł transmitancji i kąt fazowy są niezależne od częstotliwości. Moduł transmitancji jest równy jedności, natomiast kąt fazowy może być nastawiany w przedziale od około 10° do około 170°. Przedstawiono parametry zbudowanego układu modelowgo.

1. Wprowadzenie

Przesuwnik fazowy jest układem bardzo często stosowanym w magnetycznych komparatorach przepływu, mostkach transformatorowych, kompensatorach napięcia przemiennego i wielu innych przyrządach pomiarowych. Ogólnie, dla sygnału harmonicznego o pulsacji ω transmitancja przesuwnika fazowego z rys.1a ma postać:

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = K(j\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \tag{1}$$

gdzie $\varphi(\omega)$ jest przesunięciem fazowym pomiędzy napięciem wyjściowym a wejściowym.

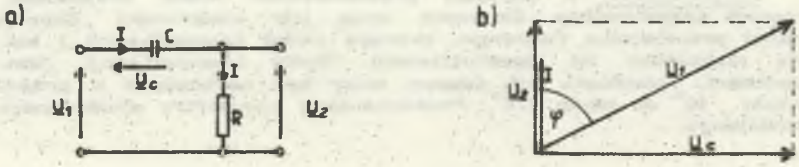


Rys.1. Symbol przesuwnika fazowego (a) i jego wykres wskazowy (b)
Fig.1. Symbol of phase shifter and its vector diagram

Na ogół żąda się, aby wartość przesunięcia fazowego $\varphi(\omega)$ wynosiła $\Pi/2$, a to w celu wytworzenia sygnału ortogonalnego do harmonicznego sygnału wejściowego. Moduł transmitancji $K(j\omega)$ powinien być równy jedności. Stosowane dotychczas układy przesuwników charakteryzowały się zależnością przynajmniej jednego z paramerów od pulsacji ω.

2. Klasyczne układy przesuwników fazowych

Podstawowym układem przesuwnika jest układ filtru górnoprzepustowego (rys.2).



Rys.2. Przesuwnik fazowy w układzie filtru górnoprzepustowego (a) i jego wykres wskazowy (b)
Fig.2. Phase shifter based on high-pass filter and its vector diagram

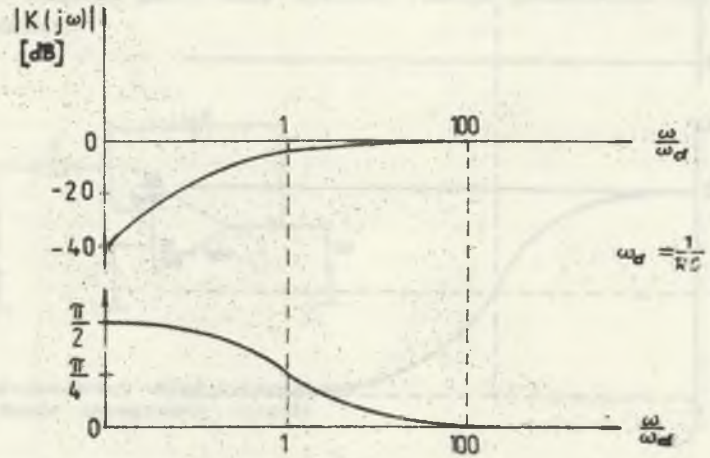
Transmitancja tego układu opisana jest równaniem (2):

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} = \sqrt{\frac{(\omega CR)^2}{1 + (\omega CR)^2}}\; e^{j \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega CR}} \qquad (2)$$

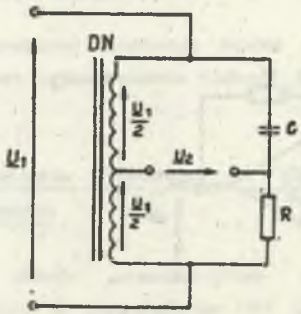
Z charakterystyki amplitudowej i fazowej (rys.3), a także z wykresu wskazowego (rys.2b) wynika, że układ ten przesuwa fazę w zakresie od 0 do $\Pi/2$. Moduł transmitancji $K(j\omega)$, jak i przesunięcie fazy $\varphi(\omega)$ zależą od pulsacji ω. Podobne właściwości posiada przesuwnik w układzie filtru dolnoprzepustowego. Pewne odmiany konstrukcyjne tego rodzaju przesuwników są współcześnie stosowane w układach mostków transformatorowych.

Innym układem jest przesuwnik z rys.4. Przy założeniu, że dzielnik napięciowy DN dzieli napięcie $\underline{U}_1$ dokładnie na połowę (uzwojenie z odczepem w środku), otrzymuje się transmitancję układu:

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - j\omega CR}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{2}\, e^{-j \operatorname{arctg} \omega CR}, \qquad (3)$$



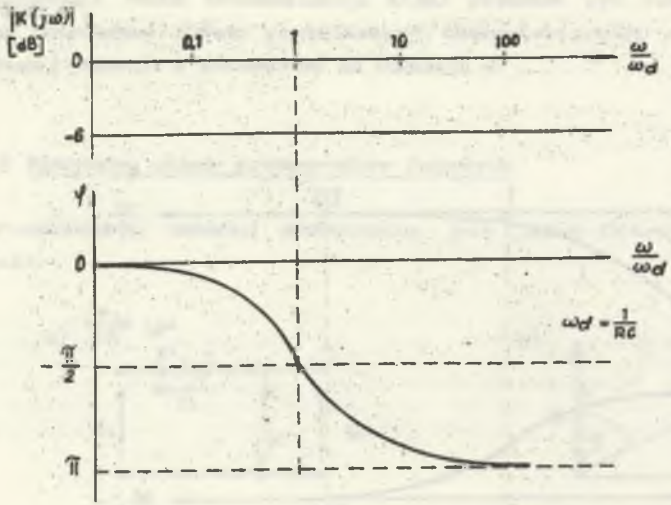
Rys.3. Charakterystyki amplitudowe i fazowe filtru górnoprzepustowego
Fig.3. Frequency characteristics of high-pass filter



Rys.4. Przesuwnik fazowy z dzielnikiem napięcia (DN - dzielnik napięcia dzielący napięcie wejściowe dokładnie na połowę)
Fig.4. Phase shifter based on precision voltage divider (DN - precision voltage divider)

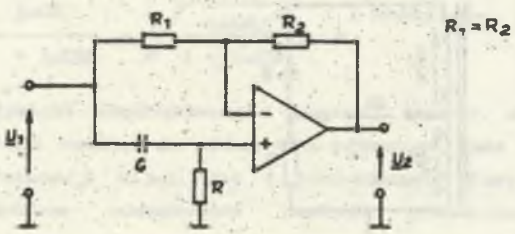
Charakterystykę amplitudowo-fazową układu przedstawiono na rys.5. Wynika z niej, iż moduł transmitancji przesuwnika nie zależy od częstotliwości i jest równy $K(j\omega) = 1/2$. Przesunięcie fazowe zależy od częstotliwości oraz od parametrów R i C. Jeśli $\omega = 1/RC$, to przesunięcie fazy wynosi - - $\Pi/2$. Należy zauważyć, iż funkcja (rys.5) posiada w punkcie $\omega = 1/RC$ punkt przegięcia, co jest niekorzystne z punktu widzenia stabilności

przesunięcia fazy w funkcji zmian ω, R, C.



Rys.5. Charakterystyki amplitudowe i fazowe układu z rys.4
Fig.5. Frequency characteristics of phase shifter from fig.4

Modyfikacją układu z rys.4 jest układ przedstawiony na rys.6.



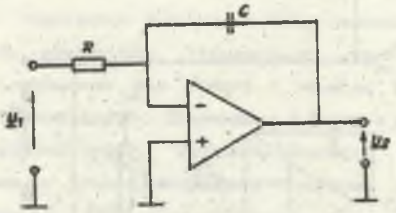
Rys.6. Układ przesuwnika fazowego ze wzmacniaczem operacyjnym
Fig.6. Phase shifter based on operational amplifier

Jego transmitancja ma postać:

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1 - j\omega CR}{1 + j\omega CR} = e^{-j\,2\,\mathrm{arctg}\,\omega CR} \qquad (4)$$

Moduł tej transmitancji jest w całym zakresie równy 1, natomiast jej faza zależy od częstotliwości i parametrów R, C. Dla ω = 1/RC przesunięcie fazy

wynosi - $\Pi/2$, w tym punkcie funkcja $\varphi(\omega)$ posiada punkt przegięcia, co pogarsza stałość przesunięcia fazy w funkcji przypadkowych zmian ω, R, C. Kolejnym układem, który może spełniać funkcję przesuwnika fazy jest integrator (rys.7).



Rys.7. Podstawowy układ integratora
Fig.7. Basic integrator circuit

Jego transmitancja jest dana równaniem:

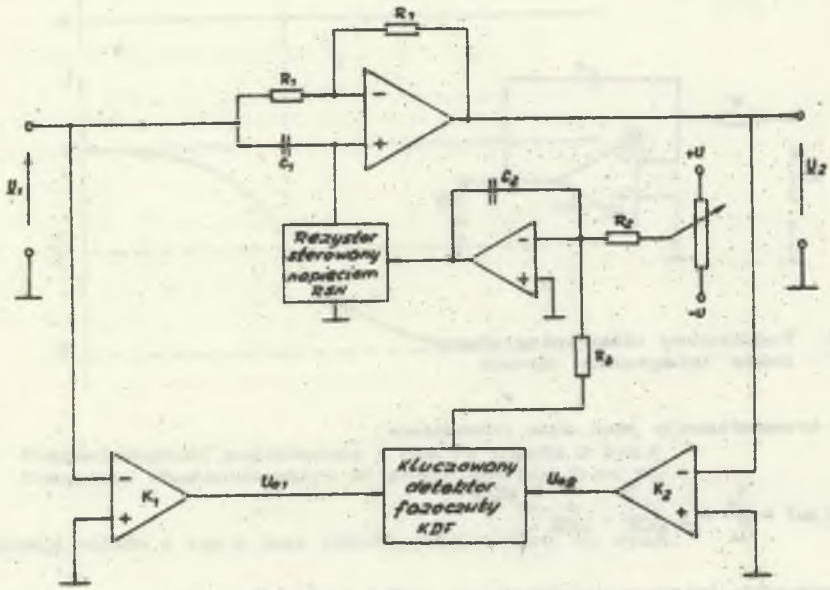
$$\underline{K}(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = j\,\frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{\omega CR}\,e^{j\Pi/2} \qquad (5)$$

W przypadku integratora idealnego moduł transmitancji ma nachylenie -6 dB na oktawę, natomiast przesunięcie fazowe jest stałe i wynosi $\Pi/2$.

3. Układ przesuwnika fazowego o przesunięciu fazy niezależnym od częstotliwości

Przedstawione układy przesuwników charakteryzowały się zależnością przynajmniej jednego z parametrów od pulsacji ω. Ponieważ w niektórych zastosowaniach jest to niedopuszczalne, autorzy zaprojektowali i zbadali przesuwnik fazowy o module transmitancji i przesunięciu fazowym niezależnym od częstotliwości w określonym przedziale jej zmian. Uproszczony schemat ideowy przesuwnika przedstawiono na rys.8. Zasadniczym elementem układu jest przesuwnik z rys.6. Zapewnia on niezależność modułu transmitancji od częstotliwości (moduł ten jest stale równy jedności). Ponieważ przesunięcie fazy dla określonej częstotliwości ω zależy od wartości R lub C, układ zapewnia samoczynne dostrajanie parametru R do wolnych zmian częstotliwości ω (przy ustalonej wartości C). Do tego celu służy rezystor sterowany napięciem (RSN). Regulację samoczynną zrealizowano wykorzystując kluczowany detektor fazoczuły [1], [3]. Na wejścia detektora doprowadzo-

ne są, po uformowaniu przez szybkie komparatory K_1 i K_2, sygnały wejściowe i wyjściowe przesuwnika.



Rys.8. Uproszczony schemat przesuwnika fazowego
Fig.8. Simplified schematic diagram of frequency-independent phase shifter

Składowa stała napięcia wyjściowego detektora fazoczułego zmienia się proporcjonalnie do przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym. Dla przesunięcia fazy równego -Π/2 osiąga wartość zero [3]. Dla przesunięć fazowych równych 0 oraz -Π odpowiadające im wartości składowych stałych napięcia wyjściowego są równe co do modułu, lecz mają przeciwny znak. Przebieg wyjściowy detektora jest całkowany w integratorze. Napięcie wyjściowe integratora steruje rezystancją R przesuwnika. Zastosowany układ samoczynnej regulacji zapewnia zachowanie stałego przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym o kąt równy -Π/2. Przewidziano możliwość nastawienia innej wartości kąta przesunięcia fazowego. Do tego celu służy potencjometr P (rys.8). Zastosowanie integratora w pętli sprzężenia zwrotnego redukuje do zera błąd ustalony, ale pogarsza dynamikę układu automatycznej regulacji fazy.

4. Realizacja i właściwości układu modelowego przesuwnika

Zrealizowany układ przesuwnika zapewnia utrzymanie stałego przesunięcia fazy równego -Π/2 z błędem bezwzględnym mniejszym niż 1 mrad w przedziale częstotliwości od 900 do 1100 Hz. W podanym zakresie częstotliwości moduł transmitancji jest równy jedności z błędem względnym mniejszym niż 1 %. Podane wartości błędów można zminimalizować po zastosowaniu jakościowo lepszych elementów. Wzmacniacz operacyjny pracujący w układzie powinien charakteryzować się dużym i stałym wzmocnieniem w zakresie częstotliwości pracy przesuwnika. Zapewnia to zmiejszenie zależności modułu transmitancji od częstotliwości. Zminimalizowanie błędu fazowego jest uzależnione od starannego zaprojektowania fazowej pętli sprzężenia zwrotnego (detektora fazoczułego [3], integratora [2], komparatorów). Szerokość przedziału częstotliwości, w którym układ utrzymuje stałą wartość fazy jest zależna od zakresu zmian rezystancji sterowanej napięciem. Pasmo częstotliwości można zmieniać poprzez zmianę pojemności C. Rezystor RSN powinien być liniowy, gdyż od charakterystyki tego elementu zależy wielkość zniekształceń wprowadzanych przez układ. W rozwiązaniu modelowym zastosowano oryginalny układ rezystora sterowanego napięciem, w którym wykorzystano efekt Millera (rys.9).

Rys.9. Koncepcja układu rezystora sterowanego napięciem
Fig.9. Idea of voltage-controlled resistor

Zniekształcenia nieliniowe wnoszone przez układ są mniejsze niż 0,5 %.

5. Uwagi o zastosowaniu przesuwnika

Zastosowanie przesuwnika jest uniwersalne, gdyż zapewnia on przesunięcie fazy względem wejściowego przebiegu sinusoidalnego zawarte w przedziale teoretycznie od 0 do -Π. Praktycznie przedział ten mieści się w zakresie od Π/16 do 5Π/16. Przesunięcie fazy i moduł transmitancji układu są

praktycznie stałe w przedziale częstotliwości od 900 do 1100 Hz. Pasmo częstotliwości pracy przesuwnika może być w prosty sposób nastawiane poprzez zmianę pojemności C.

Przedstawiony układ przesuwnika może być użyty np. w celu wytworzenia składowej ortogonalnej w układach magnetycznych komparatorów przepływów prądowych przeznaczonych do wzorcowania przekładników przemysłowych. Wymaga to przystosowania przesuwnika do pracy w zakresie częstotliwości od 45 do 65 Hz, co można łatwo osiągnąć poprzez zmianę pojemności C.

LITERATURA

[1] Praca zbiorowa. Podręcznik metrologii. WKŁ, Warszawa 1988.

[2] Kulka Z., Nadachowski M.: Analogowe układy scalone. WKŁ, Warszawa 1985.

[3] Met A.: Analogowy przetwornik fazy o dużej dokładności. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 119. Gliwice 1991.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Jerzy Jaskulski

Wpłynęło do redakcji dnia 8 kwietnia 1990 r.

ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ СО СДВИГОМ ФАЗЫ НЕЗАВИСИМЫМ ОТ ЧАСТОТЫ

Р е з ю м е

В статье рассмотрены системы применяемых до тех пор фазовращателей и их свойства. Предложен фазовращатель, у которого модуль передаточной функции и сдвиг фазы независимы от частоты. Модуль передаточной функции фазовращателя равен единицы, а сдвиг фазы может установливаться в пределах $10^\circ \div 170^\circ$. Представлены параметры построеной модели.

FREQUENCY INDEPENDENT PHASE SHIFTER

S u m m a r y

The state of art in stardard phase shifters and their properties have been presented in this paper. New frequency independent phase shifter has been suggested. Its modulus of transmittance equals one and the phase shift may be set from 10° to 170°. Parameters and properties of the model have been presented.