

ĆWICZENIE 6

Generatory przebiegów sinusoidalnych

6.1. Wstęp – przygotowanie do zajęć

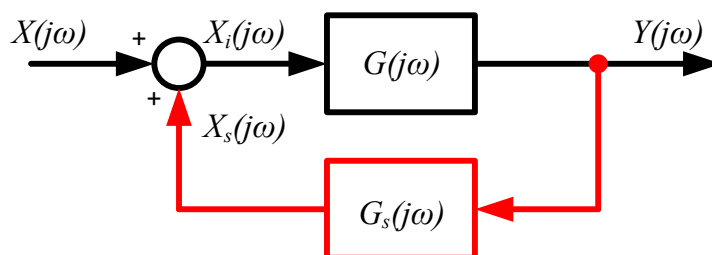
Generatory przebiegów sinusoidalnych to urządzenia elektryczne służące do wytwarzania drgań harmonicznym o stabilnej częstotliwości i amplitudzie. Do podstawowych parametrów opisujących właściwości tych układów zalicza się: częstotliwość i amplitudę przebiegu, stałość częstotliwości, stałość amplitudy oraz współczynnik zawartości harmonicznym mówiący o odkształceniu rzeczywistego przebiegu napięcia wyjściowego od idealnego przebiegu sinusoidalnego. W wypadku generatorów mocy dodatkowo uwzględnia się moc wyjściową i sprawność energetyczną. Wyróżnia się dwa rodzaje generatorów:

- dwójniki, z elementem o ujemnej rezystancji dynamicznej wzmacniającej tłumione obwody rezonansowe, chętnie stosowane w telekomunikacji (np. układy z diodami tunelowymi),
- czwórniki, ze wzmacniaczami objętymi dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

W zależności od zastosowanych w pętli sprzężenia zwrotnego elementów wyróżnia się generatory: *LC*, *RC* oraz kwarcowe.

Warunki generacji drgań sinusoidalnych w układach generatorów z pętlą dodatniego sprzężenia zwrotnego

Schemat blokowy układu zamkniętego ze sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na (Rys. 6.1). Układ wzmacniający reprezentuje blok o transmitancji widmowej $G(j\omega)$, a pętlę sprzężenia zwrotnego blok sprzężenia o transmitancji widmowej $G_s(j\omega)$.



Rys. 6.1. Układ zamknięty generatora drgań sinusoidalnych z pętlą dodatniego sprzężenia zwrotnego

Dodatnie sprzężenie zwrotne jest realizowane, kiedy chwilowe wartości sygnałów $X(j\omega)$ i $X_s(j\omega)$ spełniają zależność:

$$X_i(j\omega) = X(j\omega) + X_s(j\omega) \quad (6.1)$$

W tym wypadku zastępcza transmitancja $G_Z(j\omega)$ układu jest opisana zależnością:

$$G_Z(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{G(j\omega)}{1 - G(j\omega)G_s(j\omega)} \quad (6.2)$$

Gdzie:

$$X(t) = |X|(\cos \omega t + j \sin \omega t) = |X|e^{j\omega t} \quad (6.3)$$

$$Y(t) = |Y|[\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)] = |Y|e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (6.4)$$

Gdy przy zerowym sygnale wejściowym $X(j\omega)$, na wyjściu wzmacniacza objętego pętlą dodatniego sprzężenia zwrotnego, jak ma to miejsce w układach generatorów drgań harmonicznym, jest określony sygnał $Y(j\omega)$ oznacza to, że $G_Z(j\omega) \rightarrow \infty$.

Z tego wynika, że spełniona jest zależność:

$$1 - G(j\omega)G_s(j\omega) = 0, \quad (6.5)$$

Z zależności tej wynika, że warunkiem powstania sygnału $Y(j\omega)$ przy zerowym sygnale wejściowym $X(j\omega)$, co oznacza samoistne wzbudzenie drgań sinusoidalnych, jest spełnienie zależności:

$$|G(j\omega)||G_s(j\omega)| = 1 \quad (6.6)$$

$$\varphi(\omega) + \varphi_s(\omega) = \pm 2k\pi \quad (6.7)$$

w których:

$\varphi(\omega)$ - przesunięcie fazowe sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego w bloku wzmacniacza,

$\varphi_s(\omega)$ - przesunięcie fazowe sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego w bloku sprzężenia zwrotnego.

Zależności (6.6) i (6.7) opisują warunki jakie muszą być spełnione w układzie z dodatnim sprzężeniem zwrotnym, żeby układ generował stabilny sygnał wyjściowy. Często nazywa się je warunkami generacji, przy czym zależność (6.6) opisuje **warunek amplitudy**, a zależność (6.7) **warunek fazy**. Ponieważ oba warunki są spełnione tylko dla jednej określonej pulsacji przebiegów na wyjściu takiego układu jest generowany sygnał sinusoidalny (najczęściej napięciowy).

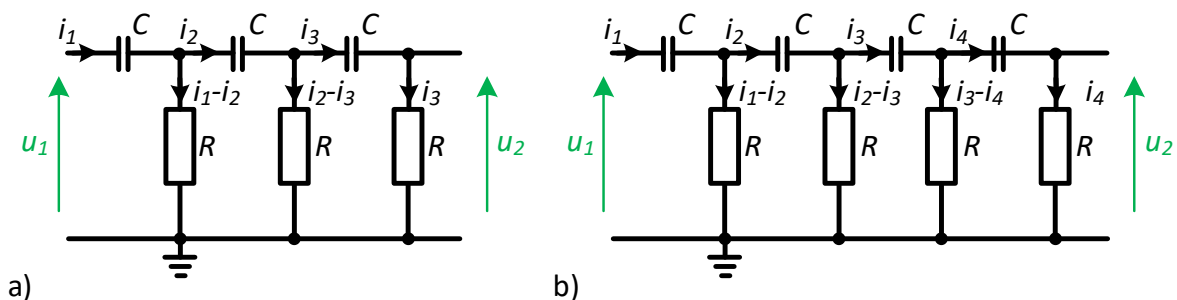
Wzbudzenie drgań w układzie wymaga spełnienia dodatkowego warunku, pozwalającego na dodatkowe wzmocnienie drgań układu:

$$|G(j\omega)||G_s(j\omega)| > 1 \quad (6.8)$$

$$\varphi(\omega) + \varphi_s(\omega) = \pm 2k\pi \quad (6.9)$$

Generatory drgań sinusoidalnych z przesuwnikami fazowymi CR w pętli sprzężenia zwrotnego

W pętli sprzężenia zwrotnego w generatorach z *przesuwnikiem fazowym* stosuje się łańcuchy o strukturze RC lub CR 3-, 4- lub 5-stopniowe (Rys.6.2.).

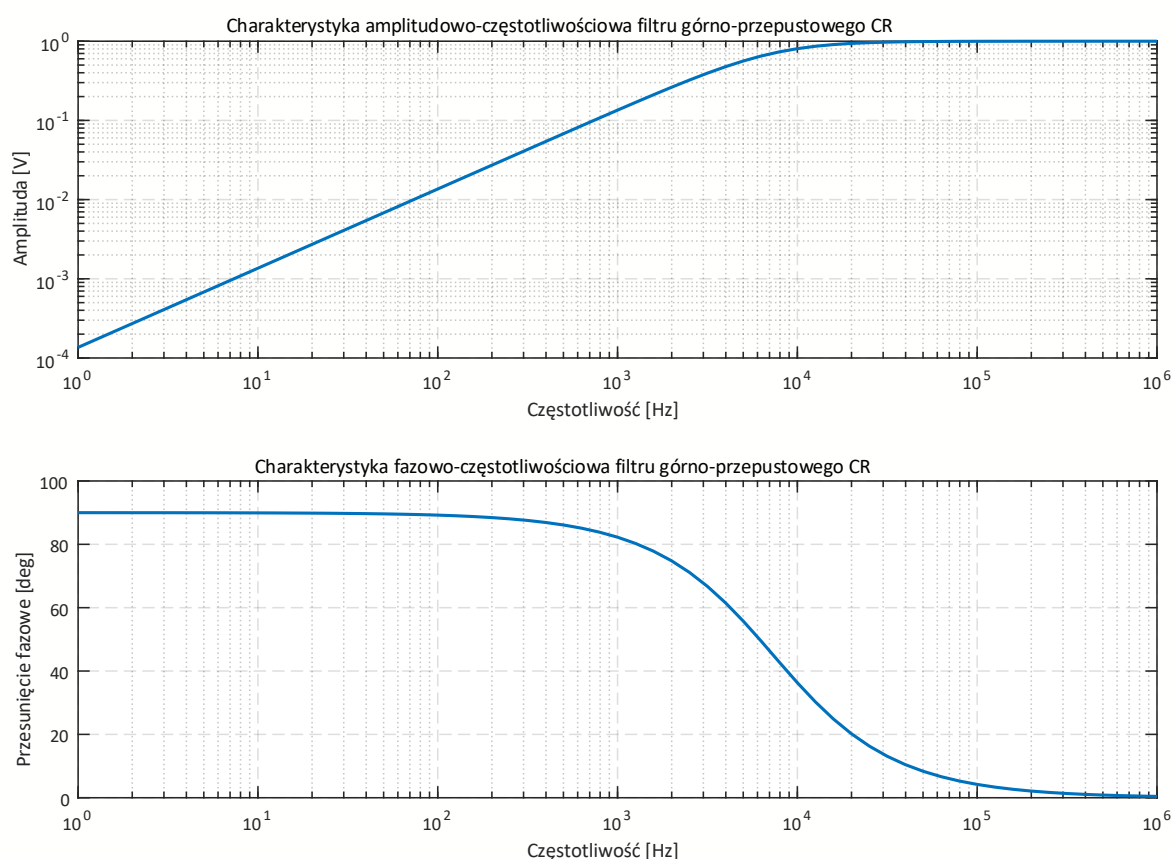


Rys. 6.2. Przesuwniki fazowe: a) łańcuch trzech członów CR, b) łańcuch czterech członów CR

W wypadku zastosowania w pętli wzmocnienia generatora odwracającego układu wzmacniacza operacyjnego zakłada się, że przesunięcie fazowe wprowadzane przez wzmacniacz jest stałe i równe π (180°). W związku z tym, aby był spełniony warunek fazy łańcuch przesuwników fazowych dla pulsacji $\omega = \omega_0$ musi wprowadzać przesunięcie fazowe równe π .

Aby wyznaczyć zależność na pulsację ω_0 , przy której dochodzi do przesunięcia fazowego równego π , należy wyznaczyć transmitancję przesuwnika fazowego zastosowanego w pętli sprzężenia zwrotnego.

Każdy z członów CR może zapewnić przesunięcie sygnałów o $\pi/2$ (teoretycznie) dla zerowej częstotliwości (pulsacji ω). Charakterystykę pojedynczego członu CR przedstawiono na Rys. 6.3. W związku z tym konieczne jest zastosowanie co najmniej trzech członów CR w przesuwniku fazowym, aby możliwe było uzyskanie przesunięcia fazowego π dla wybranej częstotliwości ω_0 .



Rys. 6.3. Charakterystyki częstotliwościowe przesuwnika CR – filtr górno-przepustowy.

Impedancja kondensatora C oraz rezystora R (Rys. 6.2) w przesuwniku fazowym można zapisać jako:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C} \quad (6.10)$$

$$Z_2 = R \quad (6.11)$$

Obwód 3-stopniowego przesuwnika fazowego (Rys. 6.2a) można zapisać za pomocą równań wynikających z praw Kirchhoffa dla każdego oczka i węzła przesuwnika:

$$u_1 = i_1(Z_1 + Z_2) - i_2Z_2 \quad (6.12)$$

$$0 = -i_1Z_2 + i_2(Z_1 + 2Z_2) - i_3Z_2 \quad (6.13)$$

$$0 = -i_2Z_2 + i_3(Z_1 + 2Z_2) \quad (6.14)$$

$$u_2 = i_3Z_2 \quad (6.15)$$

Na podstawie powyższych równań można wyznaczyć wartości poszczególnych prądów obwodu i_1, i_2, i_3 :

$$i_3 = \frac{u_2}{Z_2} \quad (6.16)$$

$$i_2 = \frac{V_2(Z_1 + 2Z_2)}{Z_2^2} \quad (6.17)$$

$$i_1 = \frac{V_2(Z_1^2 + 4Z_1Z_2 + 3Z_2^2)}{Z_2^3} \quad (6.18)$$

Uzyskane zależności dla prądów przesuwника można podstawić do równania (6.12) uzyskując zależność między napięciem v_1 i v_2 :

$$u_1 = \frac{Z_1^3 + 5Z_1^2Z_2 + 6Z_1Z_2^2 + Z_2^3}{Z_2^3} u_2 \quad (6.19)$$

W związku z powyższym, podstawiając zależności na impedancję kondensatora (6.10) oraz rezystora (6.11), po przekształceniach matematycznych transmitancja 3-stopniowego przesuwника fazowego CR wynosi:

$$G_s(j\omega) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-j\omega^3 R^3 C^3}{j(5\omega RC - \omega^3 R^3 C^3) + (1 - 6\omega^2 R^2 C^2)} \quad (6.20)$$

Aby spełniony był warunek fazy, przesuwnik fazowy powinien zapewnić przesunięcie fazowe równe π , co oznacza, że część urojona transmitancji $G_s(j\omega)$ powinna się równać 0. Zatem spełnić należy zależność:

$$1 - 6\omega^2 R^2 C^2 = 0 \quad (6.21)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{6R^2 C^2} \quad (6.22)$$

W związku z powyższym, częstotliwość, przy której przesunięcie fazowe wynosi π wynosi:

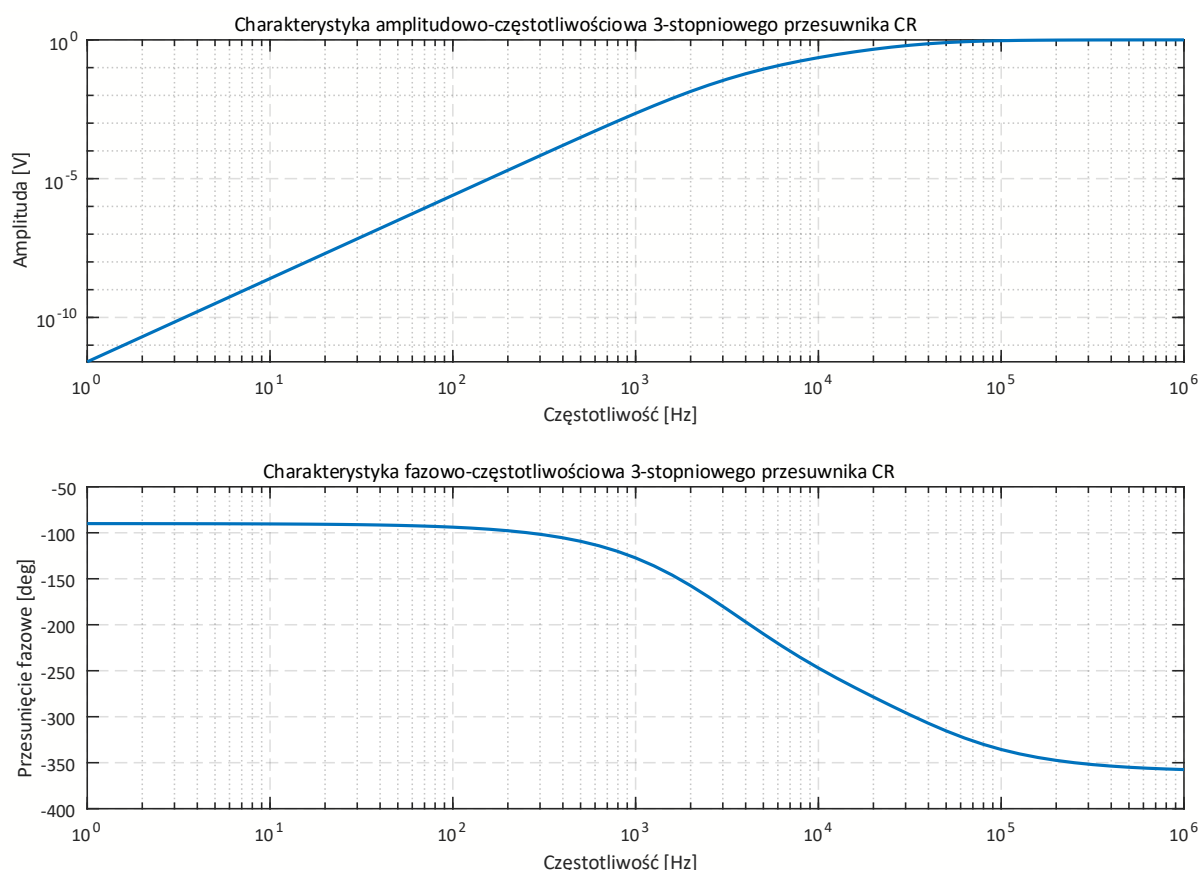
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad (6.23)$$

Aby spełniony był warunek amplitudy, wzmocnienie A_G wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym powinno być równe odwrotności tłumienia pętli sprzężenia zwrotnego A_{Gs} , które dla pulsacji ω_0 wynosi:

$$|A_{Gs}| = \left| \frac{-j\omega_0^3 R^3 C^3}{j(5\omega_0 RC - \omega_0^3 R^3 C^3) + (1 - 6\omega_0^2 R^2 C^2)} \right| = \left| \frac{-\omega_0^2 R^2 C^2}{5 - \omega_0^2 R^2 C^2} \right| = \left| \frac{-1}{6(5 - \frac{1}{6})} \right| = \frac{1}{29} \quad (6.24)$$

$$|A_G| = 29 \frac{V}{V} \quad (6.25)$$

Charakterystyki częstotliwościowe przesuwника 3-stopniowego CR przedstawiono na Rys. 6.4.



Rys. 6.4. Charakterystyki częstotliwościowe przesuwника fazowego CR 3-stopniowego

Obwód 4-stopniowego przesuwника fazowego (Rys. 6.2b) można zapisać za pomocą równań wynikających z praw Kirchhoffa dla każdego oczka i węzła przesuwника:

$$u_1 = i_1(Z_1 + Z_2) - i_2Z_2 \quad (6.26)$$

$$0 = -i_1Z_2 + i_2(Z_1 + 2Z_2) - i_3Z_2 \quad (6.27)$$

$$0 = -i_2Z_2 + i_3(Z_1 + 2Z_2) - i_4Z_2 \quad (6.28)$$

$$0 = -i_3Z_2 + i_4(Z_1 + 2Z_2) \quad (6.29)$$

$$u_2 = i_4Z_2 \quad (6.30)$$

Na podstawie powyższych równań można wyznaczyć wartości poszczególnych prądów obwodu i_1, i_2, i_3, i_4 :

$$i_4 = \frac{u_2}{Z_2} \quad (6.31)$$

$$i_3 = \frac{V_2(Z_1 + 2Z_2)}{Z_2^2} \quad (6.32)$$

$$i_2 = \frac{V_2(Z_1^2 + 4Z_1Z_2 + 3Z_2^2)}{Z_2^3} \quad (6.33)$$

$$i_1 = \frac{V_2(Z_1^3 + 6Z_1^2Z_2 + 10Z_1Z_2^2 + 4Z_2^3)}{Z_2^4} \quad (6.34)$$

Uzyskane zależności dla prądów przesuwника można podstawić do równania (6.26) uzyskując zależność między napięciem v_1 i v_2 :

$$u_1 = \frac{Z_1^4 + 7Z_1^3 Z_2 + 15Z_1^2 Z_2^2 + 10Z_1 Z_2^3 + Z_2^4}{Z_2^4} u_2 \quad (6.35)$$

W związku z powyższym, podstawiając zależności na impedancję kondensatora (6.10) oraz rezystora (6.11), po przekształceniach matematycznych transmitancja 3-stopniowego przesuwnika fazowego CR wynosi:

$$G_s(j\omega) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{\omega^4 R^4 C^4}{(1 - 15\omega^2 R^2 C^2 + \omega^4 R^4 C^4) + j(7\omega RC - 10\omega^3 R^3 C^3)} \quad (6.36)$$

Aby spełniony był warunek fazy, przesuwnik fazowy powinien zapewnić przesunięcie fazowe równe π , co oznacza, że część urojona transmitancji $G_s(j\omega)$ powinna się równać 0. Zatem spełnić należy zależność:

$$7\omega RC - 10\omega^3 R^3 C^3 = \omega RC(7 - 10\omega^2 R^2 C^2) = 0 \quad (6.37)$$

zatem:

$$(7 - 10\omega^2 R^2 C^2) = 0 \quad (6.38)$$

$$\omega_0^2 = \frac{7}{10R^2 C^2} \quad (6.39)$$

W związku z powyższym, częstotliwość, przy której przesunięcie fazowe wynosi π wynosi:

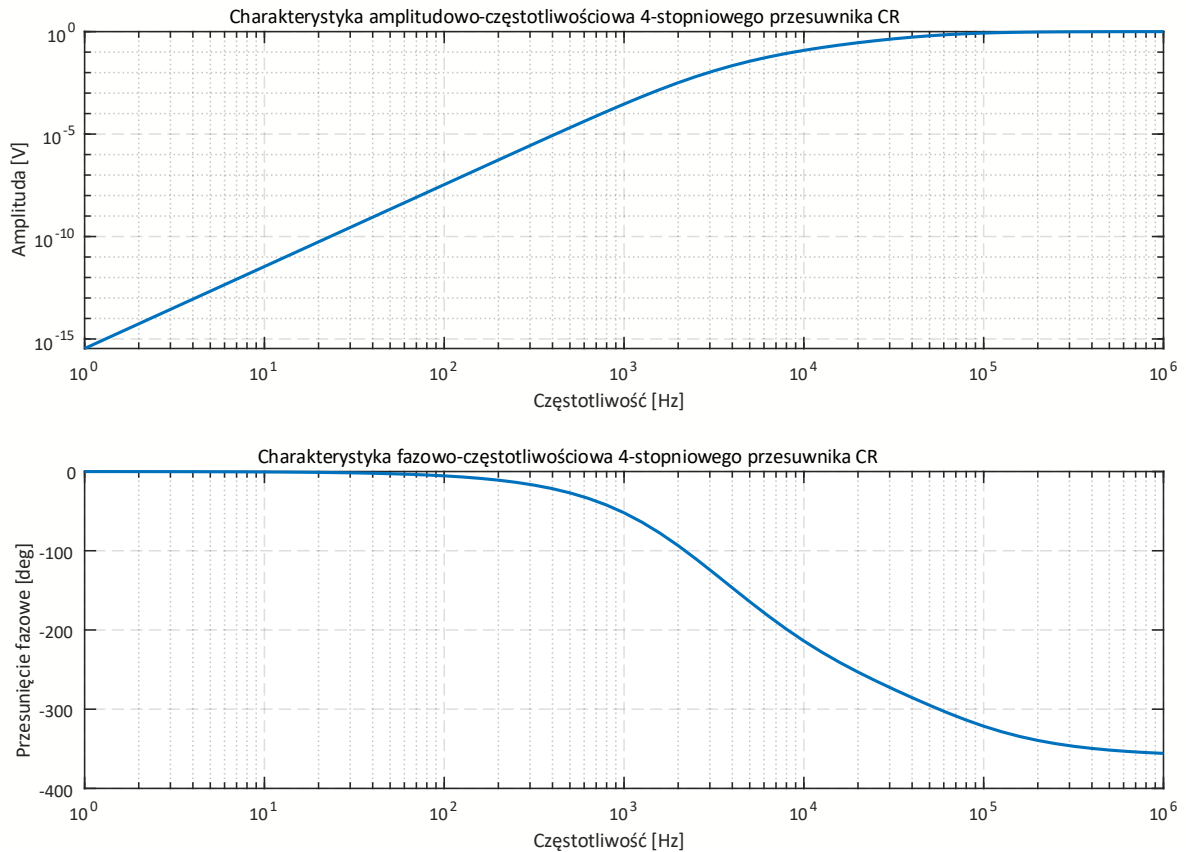
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC \sqrt{\frac{10}{7}}} \quad (6.40)$$

Aby spełniony był warunek amplitudy, wzmacnienie A_G wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym powinno być równe odwrotności tłumienia pętli sprzężenia zwrotnego A_{Gs} , które dla pulsacji ω_0 wynosi:

$$\begin{aligned} |A_{Gs}| &= \left| \frac{\omega_0^4 R^4 C^4}{(1 - 15\omega_0^2 R^2 C^2 + \omega_0^4 R^4 C^4) + j(7\omega_0 RC - 10\omega_0^3 R^3 C^3)} \right| = \left| \frac{\omega_0^2 R^2 C^2}{\frac{1}{\omega_0^2 R^2 C^2} - 15 + \omega_0^2 R^2 C^2} \right| = \left| \frac{\frac{7}{10}}{\frac{10}{7} - 15 + \frac{7}{10}} \right| = \\ &= \left| \frac{49}{100 - 1050 + 49} \right| = \left| -\frac{1}{18.39} \right| = \frac{1}{18.39} \frac{V}{V} \end{aligned} \quad (6.41)$$

$$|A_G| = 18.39 \frac{V}{V} \quad (6.42)$$

Charakterystyki częstotliwościowe przesuwnika 4-stopniowego CR przedstawiono na Rys. 6.5.



Rys. 6.5. Charakterystyki częstotliwościowe przesuwника fazowego CR 4-stopniowego

Generator drgań sinusoidalnych z mostkiem Wiena

Schemat układu generatora drgań sinusoidalnych z mostkiem Wiena przedstawiono na (Rys. 6.6). W jednej gałęzi mostka połączono dwa filtry: dolnoprzepustowy - równoległe połączenie R_2C_2 i górnoprzepustowy - szeregowe połączenie R_1C_1 , a w drugiej gałęzi dzielnik napięcia R_3, R_4 . W tym wypadku wzmacniacz operacyjny pracuje w układzie powtarzający. Sygnał wejściowy zadany w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego steruje wejściem powtarzającym. Wzmocnienie układu jest ustawione w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego dzielnikiem rezystancyjny R_3, R_4 .

Układ przedstawiony na (Rys. 6.6.) opisuje układ równań:

$$k_{uR} \cdot u_R = u_2 \quad (6.43)$$

$$\frac{R_4}{R_3+R_4} u_2 = u_- \quad (6.44)$$

$$i_{C_2} + i_{R_2} = i_1 \quad (6.45)$$

$$i_{R_2} R_2 = u_+ \quad (6.46)$$

$$C_2 \frac{du_+}{dt} = i_{C_2} \quad (6.47)$$

Wstawiając zapisane zależności do równania:

$$u_+ + i_1 R_1 + \frac{1}{C_1} \int_{-\infty}^t i_1 dt = u_2 \quad (6.48)$$

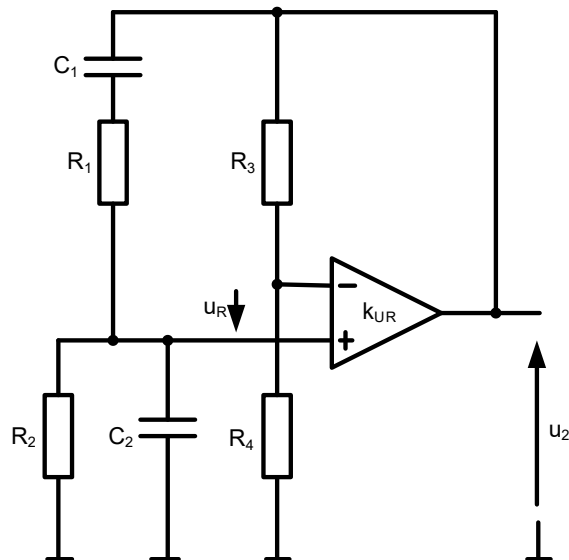
oraz przekształcając je, otrzymuje się równanie różniczkowe drugiego rzędu opisujące układ oscylacyjny:

$$\frac{d^2 u_+}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{du_+}{dt} + \omega_0 u_+ = 0 \quad (6.49)$$

gdzie tłumienie ξ i pulsacja ω_0 obwodu są równe:

$$2\varepsilon = \frac{1}{R_1 C_2} \left[1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} - \frac{k_{uR}(R_3 + R_4)}{R_3 + (1 + k_{uR})R_4} \right] \quad (6.50)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (6.51)$$



Rys. 6.6. Układ generatora drgań sinusoidalnych z mostkiem Wiena

Tłumienie $\xi = 0$ wyznacza warunek jaki musi być spełniony, aby drgania o pulsacji ω_0 były niegasnące, a generowany przebieg sinusoidalny był stabilny:

$$0 = 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} - \frac{k_{uR}(R_3 + R_4)}{R_3 + (1 + k_{uR})R_4} \quad (6.52)$$

Przyjmując wzmacniacz operacyjny jako element idealny, w którym $k_{uR} \rightarrow \infty$ to warunkiem nie tłumienia drgań w obwodzie jest zależność:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \quad (6.53)$$

6.2. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego

Ćwiczenie nr: 6 – Generator przebiegu sinusoidalnego

Materiały obowiązujące na teście i w trakcie realizacji ćwiczenia:

- 1) Wprowadzenie teoretyczne do generatorów drgań sinusoidalnych
- 2) Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego

Cel ćwiczenia: Analiza pracy przesuwników fazowych i układów generujących drgania o przebiegu sinusoidalnym – zaprojektowanie i uruchomienie generatora przebiegów sinusoidalnych.

1. Analiza charakterystyk częstotliwościowych przesuwników fazowych CR

a) Dobór pojemności i rezystancji przesuwnika dla zakładanej częstotliwości

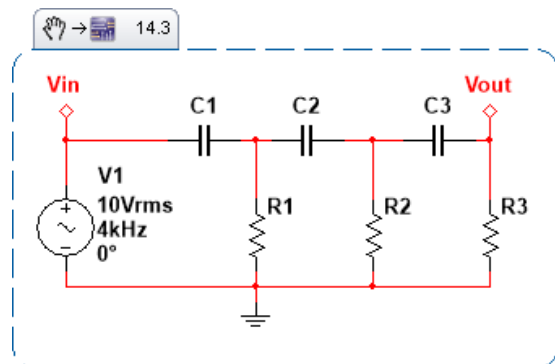
Przyjmując jedną wybraną wartość pojemności kondensatorów przesuwnika fazowego 22 nF lub 47 nF proszę wyznaczyć wartość rezystancji przesuwnika fazowego, tak aby uzyskać wybraną częstotliwość z zakresu od 1 – 10 kHz. Następnie proszę wybrać wartość rezystancji najbardziej zbliżoną do wartości wyliczonej z dostępnych w laboratorium rezystorów oraz przeliczyć częstotliwość dla danego przesuwnika CR, przy której przesunięcie fazowe wynosić będzie 180° .

b) Analiza charakterystyk częstotliwościowych przesuwnika 3- i 4- stopniowego

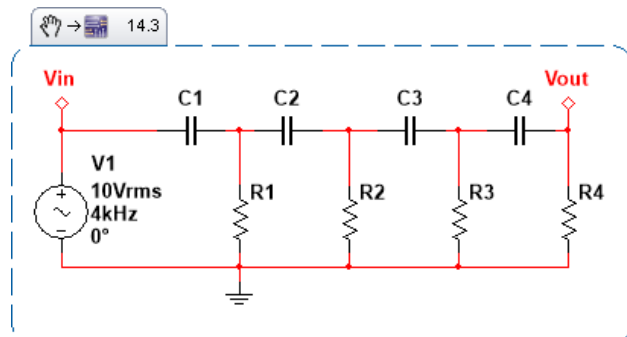
Proszę połączyć układ przesuwnika CR 3-stopniowego zgodnie z Rys. 6.2.1. Dokonując pomiarów amplitud i przesunięcia fazowego między napięciem wejściowym V_{in} oraz wyjściowym V_{out} proszę narysować charakterystyki częstotliwościowe przesuwnika dla zakresu częstotliwości od 100 Hz do 100 kHz. Do pomiaru napięć należy użyć oscyloskopu, jego funkcji pomiarowych i kursorów. Proszę sporządzić Tabelę z pomiarami oraz wyznaczonymi dla każdego pomiaru wartościami tłumienia A [p.u.] i przesunięcia fazowego w stopniach $\varphi[^\circ]$. Proszę narysować charakterystyki.

Proszę połączyć układ przesuwnika CR 4-stopniowego zgodnie z Rys. 6.2.2 oraz powtórzyć pomiary analogicznie do przesuwnika 3-stopniowego. Proszę sporządzić tabele i narysować charakterystyki.

(w symulacji – praca zdalna) Proszę porównać uzyskane wyniki pomiarów dokonanych za pomocą oscyloskopu z wynikami analizy ACsweep przeprowadzonej w programie Multisim.



Rys. 6.2.1. Schemat układu do analizy przesuwnika CR 3-stopniowego



Rys. 6.2.2. Schemat układu do analizy przesuwnika CR 4-stopniowego

2. Analiza pracy generatora drgań sinusoidalnych z wybranym przesuwnikiem CR i wzmacniaczem operacyjnym.

Proszę połączyć wybrany przesuwnik fazowy (3- lub 4-stopniowy) do wzmacniacza operacyjnego, zgodnie z Rys. 6.2.3 tak, aby spełnić warunki generacji drgań nietłumionych. Proszę zwrócić uwagę na prawidłowe podłączenie ostatniego członu przesuwnika do odwracającego wzmacniacza operacyjnego.

Proszę dobrać wartość wzmocnienia układu odwracającego wzmacniacza tak, aby doprowadzić do wzbudzenia drgań. Uzyskane przebiegi napięcia generowanego proszę zapisać w formie cyfrowej.

Proszę dobrać wartość graniczną wzmocnienia wzmacniacza odwracającego, przy której generator pracuje stabilnie (amplituda uzyskanego napięcia jest stała, nietłumiona i nieodkształcona). Uzyskane wartości rezystancji i wzmocnienia proszę zanotować w raporcie.

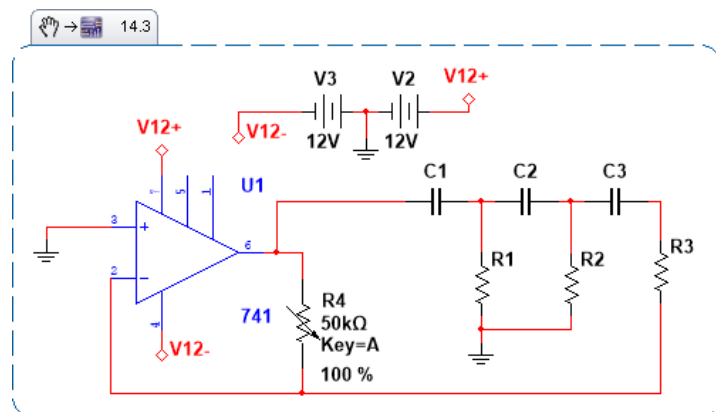
Proszę zmierzyć częstotliwość i amplitudę generowanego przebiegu sinusoidalnego, a następnie porównać wyniki z wartościami teoretycznymi.

3. (dodatkowo) Analiza pracy generatora drgań sinusoidalnych z mostkiem Wiena.

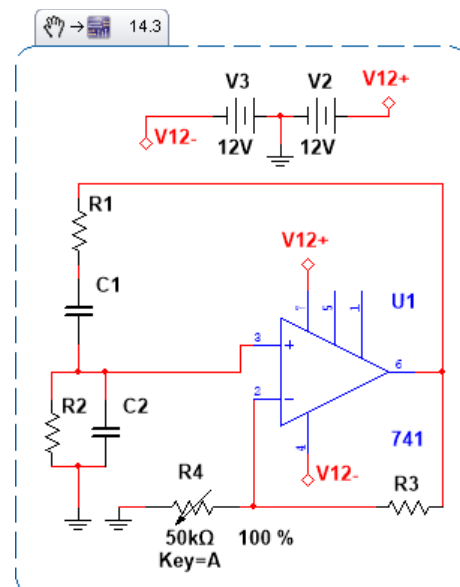
Proszę połączyć obwód generatora drgań sinusoidalnych z mostkiem Wiena-Robinsona zgodnie ze schematem z Rys. 6.2.4. Przyjmując jedną wybraną wartość pojemności w gałęziach mostka Wiena: 22 nF lub 47 nF proszę wyznaczyć wartość rezystancji mostka, tak aby uzyskać wybraną częstotliwość z zakresu od 1 – 10 kHz. Następnie proszę wybrać wartość rezystancji najbardziej zbliżoną do wartości wyliczonej z dostępnych w laboratorium rezystorów oraz przeliczyć teoretyczną częstotliwość drgań układu.

Obserwując na oscyloskopie napięcie wyjściowe generatora drgań (wyjście wzmacniacza operacyjnego) proszę dobrać wartości rezystorów R3 i R4 tak, aby wzbudzić drgania sinusoidalne stabilne i nieodkształcone. Uzyskany przebieg proszę zapisać w formie cyfrowej.

Proszę zmierzyć częstotliwość i amplitudę generowanego przebiegu sinusoidalnego, a następnie porównać wartości uzyskane z wartościami teoretycznymi.



Rys. 6.2.3. Schemat generatora drgań przebiegów sinusoidalnych z przesuwnikiem CR 3-stopniowym.



Rys. 6.2.4. Schemat generatora drgań przebiegów sinusoidalnych z mostkiem Wiena

6.3. Zawartość raportu z przebiegu ćwiczenia

Laboratorium podstaw elektroniki SK2A – Ćw. 6 Generatory drgań sinusoidalnych				
Rodzaj studiów:	Stacjonarne		Kierunek studiów:	Elektrotechnika
Grupa dziekańska:		Data i godzina:		Nr zespołu:
Skład zespołu:				

1a. Dobór pojemności i rezystancji przesuwника dla zakładanej częstotliwości

Wybrana pojemność przesuwника fazowego: $C = \dots\dots\dots$

Wybrana częstotliwość drgań: $f = \dots\dots\dots$

Wyznaczona wartość rezystancji przesuwника fazowego 3-stopniowego: $R = \dots\dots\dots$

Wyznaczona teoretyczna częstotliwość drgań zaprojektowanego przesuwника 3-stopniowego:

$f = \dots\dots\dots$

Wyznaczona wartość rezystancji przesuwника fazowego 4-stopniowego: $R = \dots\dots\dots$

Wyznaczona teoretyczna częstotliwość drgań zaprojektowanego przesuwника 4-stopniowego:

$f = \dots\dots\dots$

1b. Analiza charakterystyk częstotliwościowych przesuwника 3- i 4- stopniowego

Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przesuwника 3-stopniowego:

Pomiary i obliczenia:

Amplituda V_{INp-p}	V										
Częstotliwość f_{IN}	Hz										
Amplituda V_{OUTp-p}	V										
Opóźnienie napięcia	s										
Przesunięcie fazowe	rad										
Amplituda V_{INp-p}	V										
Częstotliwość f_{IN}	Hz										
Amplituda V_{OUTp-p}	V										
Opóźnienie napięcia	s										
Przesunięcie fazowe	rad										

(Rysunek - Charakterystyka)

Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przesuwника 4-stopniowego:

Pomiary i obliczenia:

Amplituda V_{INp-p}	V										
Częstotliwość f_{IN}	Hz										
Amplituda V_{OUTp-p}	V										
Opóźnienie napięcia	s										
Przesunięcie fazowe	rad										
<hr/>											
Amplituda V_{INp-p}	V										
Częstotliwość f_{IN}	Hz										
Amplituda V_{OUTp-p}	V										
Opóźnienie napięcia	s										
Przesunięcie fazowe	rad										

(Rysunek - Charakterystyka)

2. Analiza pracy generatora drgań sinusoidalnych z wybranym przesuwnikiem CR i wzmacniaczem operacyjnym

Wartość rezystancji R_4 przy której układ generuje drgania: $R_4 = \dots\dots\dots$

Wartość wzmacnienia układu odwracającego: $k_U = \dots\dots\dots$

Wartość minimalna rezystancji R_4 przy której układ generuje drgania sinusoidalne nieodkształcone: $R_4 = \dots\dots\dots$

Wartość wzmacnienia układu odwracającego: $k_U = \dots\dots\dots$

Amplituda generowanego przebiegu: $V_{\text{outp-p}} = \dots\dots\dots$

Częstotliwość generowanego przebiegu: $f_{\text{out}} = \dots\dots\dots$

3. (Dodatkowo) Oszacowanie wartości rezystancji w układzie bezpośredniego zasilania bez sprzężenia zwrotnego.

Wybrana pojemność mostka Wiena: $C = \dots\dots\dots$

Wybrana częstotliwość drgań: $f = \dots\dots\dots$

Wyznaczona wartość rezystancji dla gałęzi mostka Wiena: $R = \dots\dots\dots$

Wyznaczona teoretyczna częstotliwość drgań mostka Wiena: $f = \dots\dots\dots$

Wartości rezystancji R_3 i R_4 pozwalające na wzbudzenie drgań sinusoidalnych, stabilnych i nieodkształconych: $R_3 = \dots\dots\dots$, $R_4 = \dots\dots\dots$

Amplituda generowanego przebiegu: $V_{\text{outp-p}} = \dots\dots\dots$

Częstotliwość generowanego przebiegu: $f_{\text{out}} = \dots\dots\dots$

4. Porównanie układów – wnioski.

6.4. Przykładowe pytania sprawdzające

- Proszę narysować schemat układu generatora drgań sinusoidalnych z przesuwnikiem 3-stopniowym
- Proszę narysować schemat układu generatora drgań sinusoidalnych z przesuwnikiem 4-stopniowym
- Proszę podać wzór na częstotliwość, przy której przesuwnik 3-stopniowy zapewnia 180° przesunięcia fazowego
- Proszę podać wzór na częstotliwość, przy której przesuwnik 4-stopniowy zapewnia 180° przesunięcia fazowego
- Proszę podać warunki generacji drgań w układach generatorów z dodatnim sprzężeniem zwrotnym
- Proszę narysować schemat generatora drgań sinusoidalnych z mostkiem Wiena-Robinsona
- Proszę podać wzór na częstotliwość drgań mostka Wiena
- Proszę Podać zależność rezystorów i kondensatorów generatora z mostkiem Wiena, przy której generowany jest stabilny przebieg sinusoidalny.

Odpowiedzi na pytania znajdują się w rozdziale 6.1.