

Politechnika Warszawska
Instytut Radioelektroniki
Zakład Radiokomunikacji

WIECZOROWE STUDIA ZAWODOWE



Warszawa, kwiecień 2008

1. Cel ćwiczenia

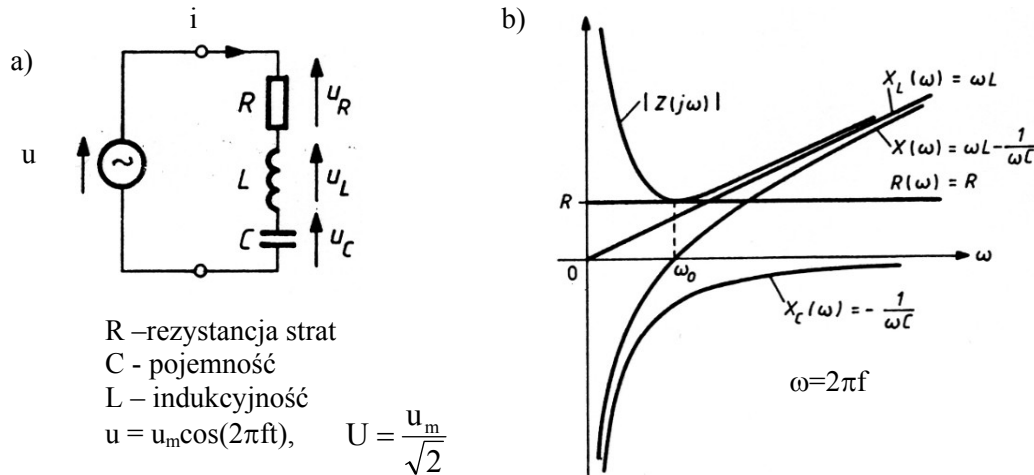
Celem ćwiczenia jest badanie właściwości obwodów rezonansowych: szeregowego, równoległego oraz sprzężonych pojemnościowo z uwzględnieniem rzeczywistego źródła pobudzającego oraz strat w obwodach.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Obwód rezonansowy szeregowy

Szeregowy obwód rezonansowy składa się z szeregowo połączonych: indukcyjności oraz pojemności. Obwód jest pobudzany ze źródła napięciowego o zerowej rezystancji wewnętrznej.

W praktyce można założyć, że straty obwodu wynikają z oporności strat cewki indukcyjnej (Rys.1).



Rys.1. Szeregowy obwód rezonansowy z stratną cewką pobudzany ze źródła napięciowego

a) schemat elektryczny

b) wykresy reaktancji pojemnościowej X_C , indukcyjnej X_L , modułu impedancji $|Z|$ i rezystancji R w funkcji pulsacji (częstotliwości)

Impedancja obwodu wynosi:

$$Z = \frac{U}{I} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = |Z| e^{j\varphi_Z} \quad (1)$$

Moduł impedancji obwodu wynosi:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2)$$

a kąt fazowy impedancji:

$$\varphi_Z = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (3)$$

Częstotliwość, przy której reaktancja obwodu $X(f) = 0$ ($\omega_r L = 1/\omega_r C$) nosi nazwę częstotliwości rezonansowej, obwód jest w stanie rezonansu:

$$f_r = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (4)$$

Impedancja obwodu jest wtedy równa rezystancji strat $|Z| = R$. Dla częstotliwości $f < f_0$ obwód ma charakter pojemnościowy $X(f) < 0$, dla częstotliwości $f > f_0$ obwód ma charakter indukcyjny $X(f) > 0$.

W rezonansie przesunięcie fazowe między prądem I a napięciem U jest równe zero, przy czym natężenie prądu I w obwodzie osiąga wartość maksymalną. W rezonansie napięcia na indukcyjności i pojemności są sobie równe co do wartości $U_L = U_C$. Na obu tych elementach występuje *przepięcie* jeżeli $\omega L > R$. Jest ono spowodowane gromadzeniem przez obwód energii kolejnych okresów prądu zmiennego. Indukcyjność i kondensator przekazują sobie w kolejnych półokresach energię drgań.

Wielkość

$$Q = 2\pi \frac{\text{maksym. całkowita energia w obwodzie}}{\text{energia tracona w obwodzie w jednym okresie}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\sqrt{L}}{R} = \frac{\rho}{R} \quad (5)$$

jest współczynnikiem dobroci obwodu, $\rho = \sqrt{L/C}$ jest opornością charakterystyczną obwodu

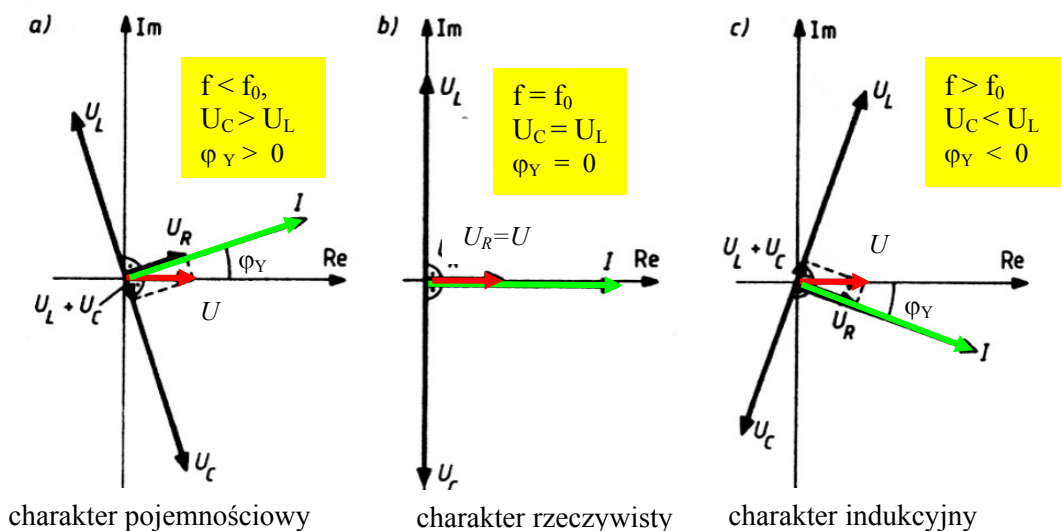
W obwodzie rezonansowym płynie prąd:

$$I = \frac{U}{Z} = YU = U|Y|e^{j\varphi_Y} = \frac{U}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} e^{-j\arctg\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}} = I_m e^{j\varphi_Y} \quad (6)$$

Wykres zależności natężenia prądu I_m lub modułu admittancji $|Y|$ w obwodzie od częstotliwości nosi nazwę *krzywej rezonansowej amplitudowej obwodu*. Krzywa ta posiada maksimum przy częstotliwości rezonansowej, tym większe im większa jest wartość Q .

Wykres zależności kąta fazowego prądu φ_Y w obwodzie (kąta fazowego admittancji obwodu) od częstotliwości nosi nazwę *krzywej rezonansowej fazowej obwodu*.

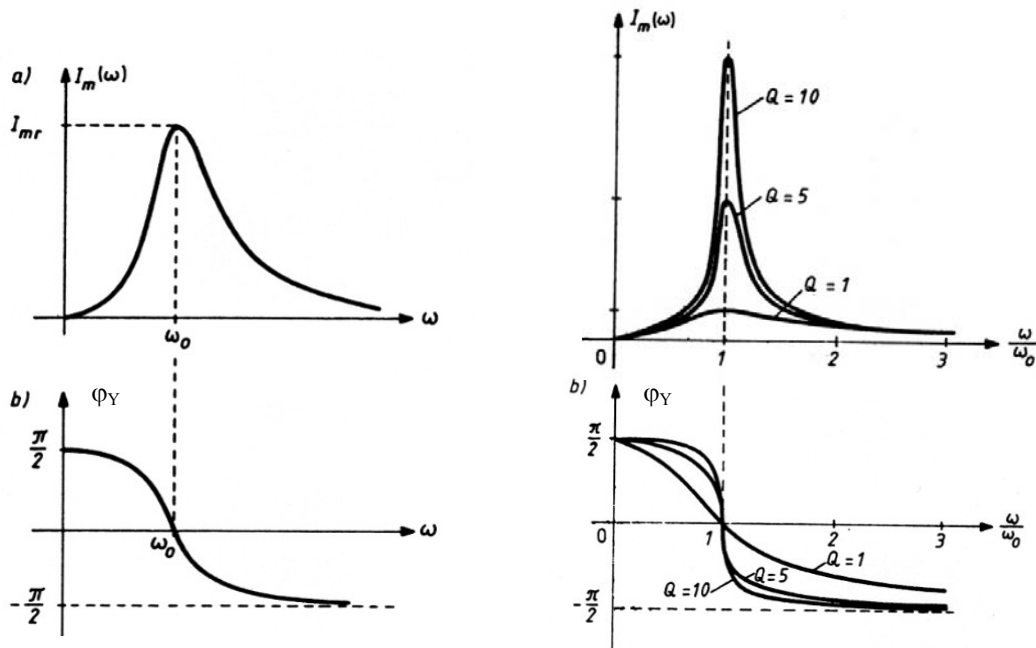
Rozkład napięć i prądów w obwodzie rezonansowym dla częstotliwości $f < f_0$, $f = f_0$ oraz $f > f_0$ pokazano na wykresach wskazowych (Rys.2).



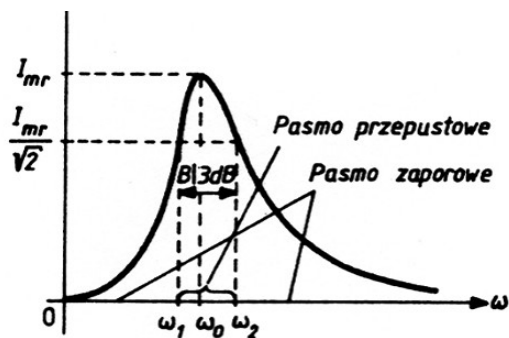
Rys.2. Wykresy wskazowe napięć i prądów w obwodzie szeregowym

Dla $f < f_0$ prąd I wyprzedza w fazie napięcie U ($\varphi_Y > 0$), dla $f > f_0$ prąd I opóźnia się względem U ($\varphi_Y < 0$). Napięcie U_R na rezystancji R jest zawsze w fazie z prądem I . Napięcie na indukcyjności U_L wyprzedza w fazie prąd I o 90° , a napięcie na pojemności U_C opóźnia się w fazie w stosunku do prądu I o 90° . Napięcie całkowite U jest sumą geometryczną napięć składowych. W przypadku pokazanym na Rys.2c napięcie na indukcyjności jest większe od napięcia na pojemności co oznacza, że obwód ma charakter indukcyjny. W przypadku pokazanym na Rys.2a napięcie na pojemności jest większe od napięcia na indukcyjności co oznacza, że obwód ma charakter pojemnościowy. W przypadku pokazanym na Rys.2b napięcie na pojemności jest równe napięciu na indukcyjności co oznacza, że obwód jest w rezonansie i ma charakter rzeczywisty.

Na Rys.3 pokazano przykładowe krzywe rezonansowe w funkcji częstotliwości przy małej i dużej wartości Q w obwodzie rezonansowym szeregowym. Szerokość krzywej rezonansowej określa się jako różnicę częstotliwości $f_2 - f_1$, przy których wartość modułu admittancji $|Y|$ lub prądu I_m jest równa $0,707$ wartości zmierzonej przy częstotliwości rezonansowej f_0 (Rys.4).



Rys.3. Krzywe rezonansowe obwodów szeregowych o różnych dobrociach



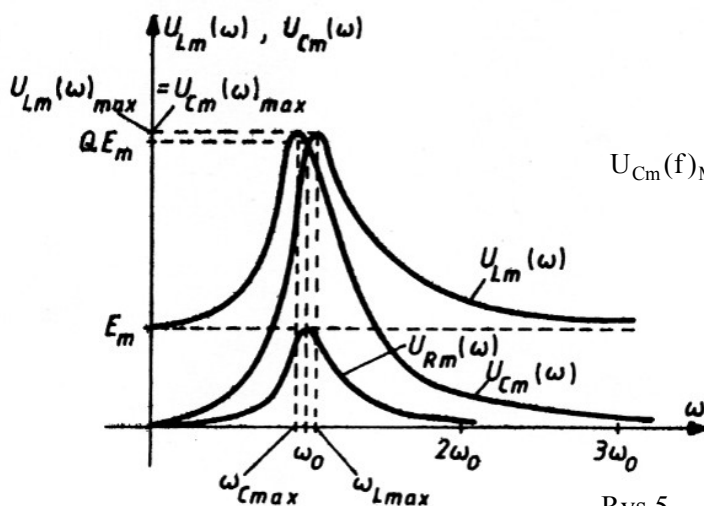
$$f_1 = f_0 \left(-\frac{1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right) \quad (7)$$

$$f_2 = f_0 \left(\frac{1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right) \quad (8)$$

Rys.4.

Zakładając, że straty obwodu rezonansowego wynikają tylko ze strat w cewce można wykazać, że:

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad \text{gdzie } B \text{ jest szerokością 3-dB pasma przepustowego obwodu rezonansowego} \quad (9)$$



$$U_{Lm}(f)_{MAX} = \frac{QU}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} > QU_m = U_{Lmr}$$

$$U_{Cm}(f)_{MAX} = U_{Lm}(f)_{MAX} = \frac{QU}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} > QU_m = U_{Cmr}$$

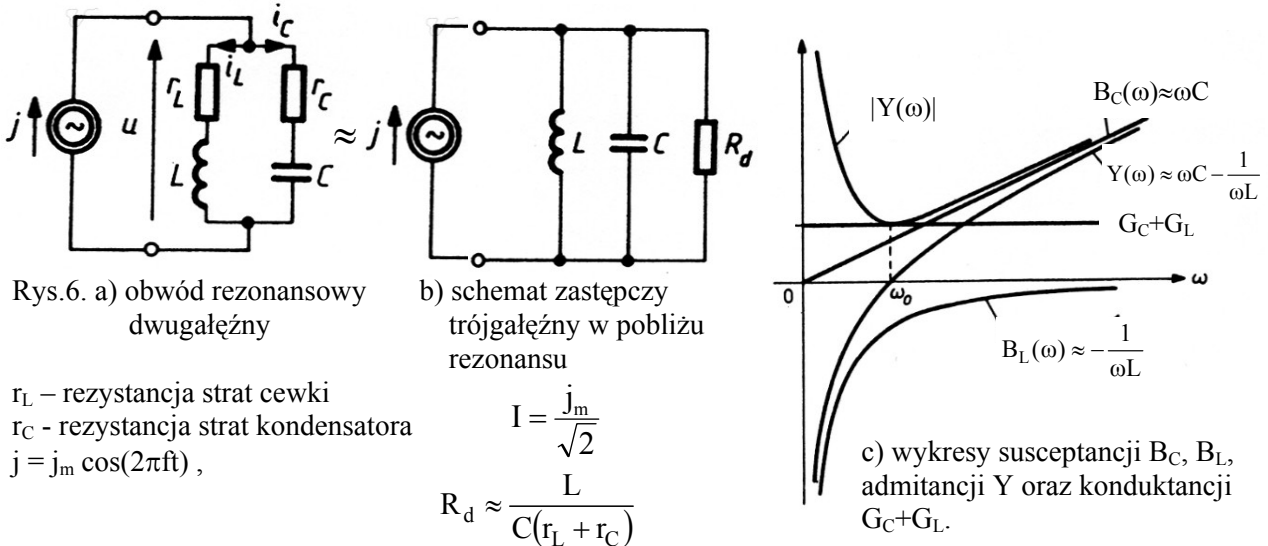
$$f_{LmMAX} = \frac{f_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}} > f_0 \quad (10)$$

$$f_{CmMAX} = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} < f_0$$

Rys.5.

2.2. Obwód rezonansowy równoległy dwugładźny

Równoległy obwód rezonansowy składa się z równoległe połączonych: indukcyjności oraz pojemności ze stratami. Straty kondensatora i cewki są reprezentowane oporami r_L i r_C (Rys.6). Obwód jest pobudzany ze źródła prądowego o nieskończenie dużej rezystancji wewnętrznej.



r_L – rezystancja strat cewki
 r_C – rezystancja strat kondensatora
 $j = j_m \cos(2\pi ft)$,

$$I = \frac{j_m}{\sqrt{2}}$$

$$R_d \approx \frac{L}{C(r_L + r_C)}$$

admitancja obwodu wynosi:

$$Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) = \frac{G_L}{r_L^2 + \omega^2 L^2} + \frac{G_C}{r_C^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} + j \left(\frac{B_L}{r_L^2 + \omega^2 L^2} + \frac{B_C}{r_C^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \right) = |Y| e^{j\varphi_Y} \quad (11)$$

moduł admitancji obwodu wynosi:

$$|Y| = \sqrt{\left(\frac{r_L}{r_L^2 + \omega^2 L^2} + \frac{1}{r_C^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \right)^2 + \left(\frac{-\omega L}{r_L^2 + \omega^2 L^2} + \frac{1}{r_C^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \right)^2} \quad (12)$$

a kąt fazowy admitancji

$$\varphi_Y = \arctan \frac{\frac{-\omega L}{r_L^2 + \omega^2 L^2} + \frac{1}{r_C^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}{\frac{r_L}{r_L^2 + \omega^2 L^2} + \frac{r_C}{r_C^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \quad (13)$$

Jeżeli $r_C \neq \sqrt{\frac{L}{C}}$, $r_L \neq \sqrt{\frac{L}{C}}$, to częstotliwość rezonansowa w obwodzie równoległym dwugładźnym

wynosi:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - r_L^2}{\frac{L}{C} - r_C^2}} = f_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{L}{Q_{L0}^2}}{1 - \frac{L}{Q_{C0}^2}}} \quad (14)$$

$$Q_{L0} = \frac{\omega_0 L}{r_L}, \quad Q_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C r_C}$$

dobroć obwodu $\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{L0}} + \frac{1}{Q_{C0}}$

Jeżeli $r_C = r_L \neq \sqrt{\frac{L}{C}}$, to częstotliwość rezonansowa wynosi: $f_r = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

W stanie rezonansu dwugałęźny obwód jest reprezentowany przez rezystancję dynamiczną, której przybliżona wartość wynosi:

$$R_d \approx \frac{L}{(r_C + r_L)C} = \omega_r L Q = \frac{Q}{\omega_r C} \quad (15)$$

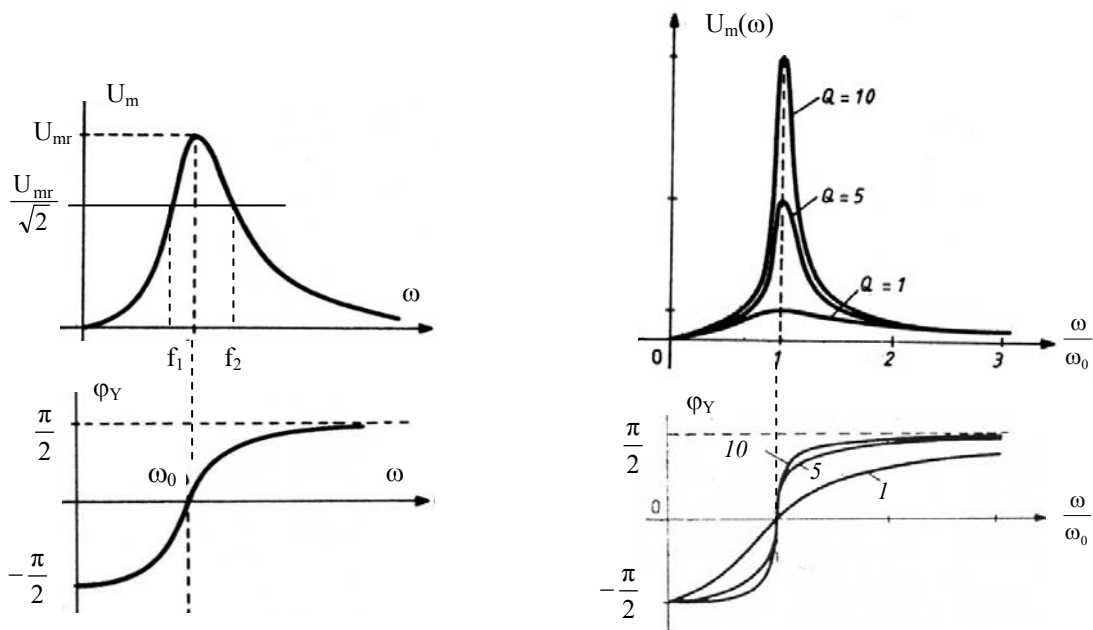
Napięcie na obwodzie

$$U = \frac{I}{Y} = ZI = I|Z|e^{j\varphi_Z} = U_m e^{-j\varphi_Y} \quad (16)$$

Wykres zależności napięcia U_m na obwodzie lub modułu impedancji obwodu $|Z|$ od częstotliwości nosi nazwę *krzywej rezonansowej amplitudowej obwodu*. Krzywa ta posiada maksimum przy częstotliwości rezonansowej, tym większe im większa jest wartość Q .

Wykres zależności kąta fazowego prądu w obwodzie φ_Y (kąta fazowego admitancji obwodu) od częstotliwości nosi nazwę *krzywej rezonansowej fazowej obwodu*.

Na Rys.7 pokazano przykładowe krzywe rezonansowe w funkcji częstotliwości przy małej i dużej wartości Q w obwodzie rezonansowym równoległym. Szerokość krzywej rezonansowej określa się jako różnicę częstotliwości $f_2 - f_1$, przy których wartość modułu impedancji $|Z|$ lub napięcia U_m jest równa 0,707 wartości zmierzonej przy częstotliwości rezonansowej f_r



Rys.7. Krzywe rezonansowe obwodów równoległych dwugałęźnych o różnych dobrociach

Prądy skuteczne w gałęziach obwodu równoległego dwugałęźnego są następujące:

$$I_L = Y_L U = G_L U - jB_L U \quad (17)$$

$$I_C = Y_C U = G_C U + jB_C U$$

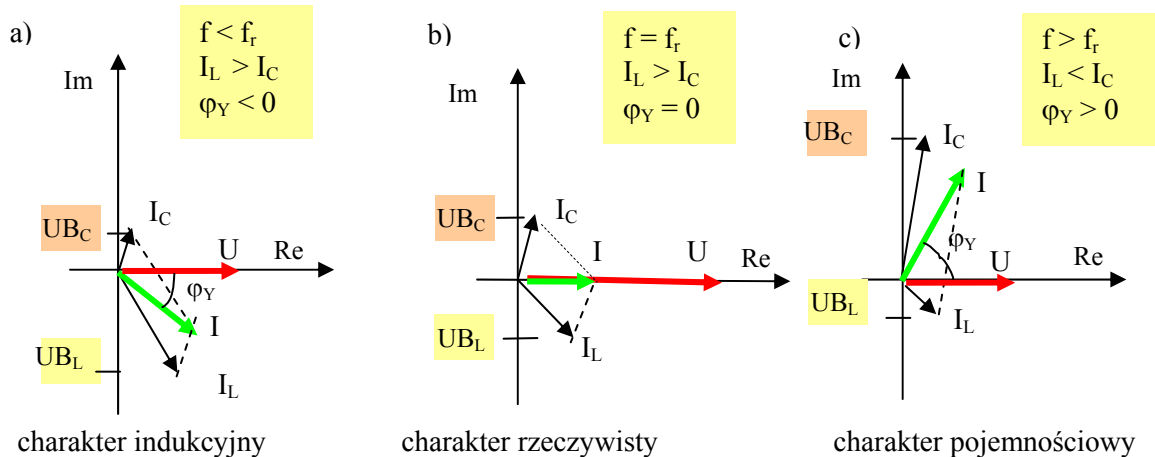
$$I = I_L + I_C = (G_L + G_C)U + j(B_C - B_L)U = GU + jBU$$

W stanie rezonansu prądy bierne w gałęziach obwodu I_L oraz I_C są Q krotnie większe niż prąd dopływający ze źródła. Zjawisko to nosi nazwę przetężenia rezonansowego $I_{Lmr} \approx I_{Cmr} \approx Q I_{mr}$.

Rezonans w rozważanym obwodzie wystąpi wtedy, gdy kąt fazowy admitancji układu $\varphi_Y = 0$ co jest spełnione gdy susceptancja obwodu $B = 0$, czyli gdy susceptancja pojemnościowa jest równa susceptancji indukcyjnej tzn. $B_C = B_L$.

W stanie rezonansu składowe bierne prądów I_L i I_C są sobie równe co do wartości ale mają przeciwne fazy tzn. $B_L U = B_C U$. Prąd wypadkowy I jest wtedy w fazie z napięciem U (Rys.8b).

Wykresy wektorowe obwodu równoległego dwugałęzowego dla częstotliwości $f < f_r$, $f > f_r$ oraz $f = f_r$ przy $r_L > r_C$ pokazano na Rys.8.

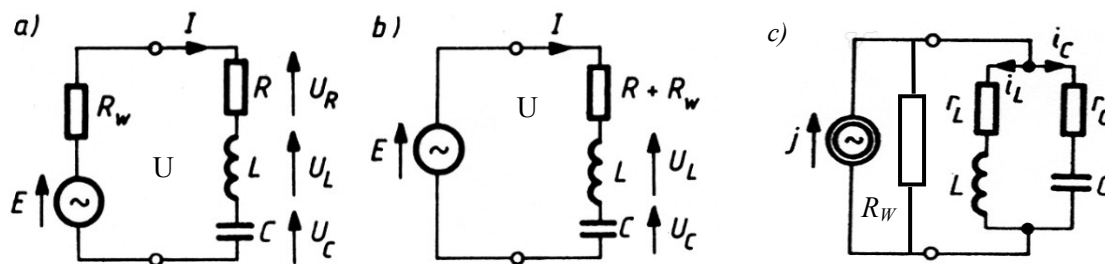


Rys.8. Wykresy wskazowe napięć i prądów w obwodzie równoległym dwugałęzowym

Przy częstotliwości mniejszej od rezonansowej obwód ma charakter indukcyjny (kąt fazowy prądu ujemny $\varphi_Y < 0$) a przy częstotliwościach większych od rezonansowej – charakter pojemnościowy (kąt fazowy prądu dodatni $\varphi_Y > 0$).

2.3. Wpływ źródła rzeczywistego

W praktyce rozpatrując działanie obwodów rezonansowych należy uwzględnić oporność wewnętrzną R_w źródła. (Rys.9).



Rys.9.

Dobroć obwodu szeregowego z uwzględnieniem rezystancji wewnętrznej źródła R_w wynosi

$$Q' = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R + R_w} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R \left(1 + \frac{R_w}{R}\right)} = \frac{Q}{1 + \frac{R_w}{R}} \quad (18)$$

gdzie Q jest dobrocią źródła bez rezystancji wewnętrznej. Rezystancję wewnętrzną źródła należy w tym przypadku traktować jako rezystancję strat obwodu, w wyniku czego jego dobroć zmniejsza się.

Zmniejszenie dobroci powoduje poszerzenie pasma obwodu $1 + R_w/R$ razy: $B' = B(1 + R_w/R)$ gdzie B jest szerokością pasma 3-dB obwodu pobudzanego ze źródła o zerowej rezystancji wewnętrznej. Obwód szeregowy o dużej dobroci, połączony ze źródłem o bardzo dużej rezystancji wewnętrznej, całkowicie traci właściwości selektywne. Prąd płynący przez obwód jest wtedy niezależny od częstotliwości.

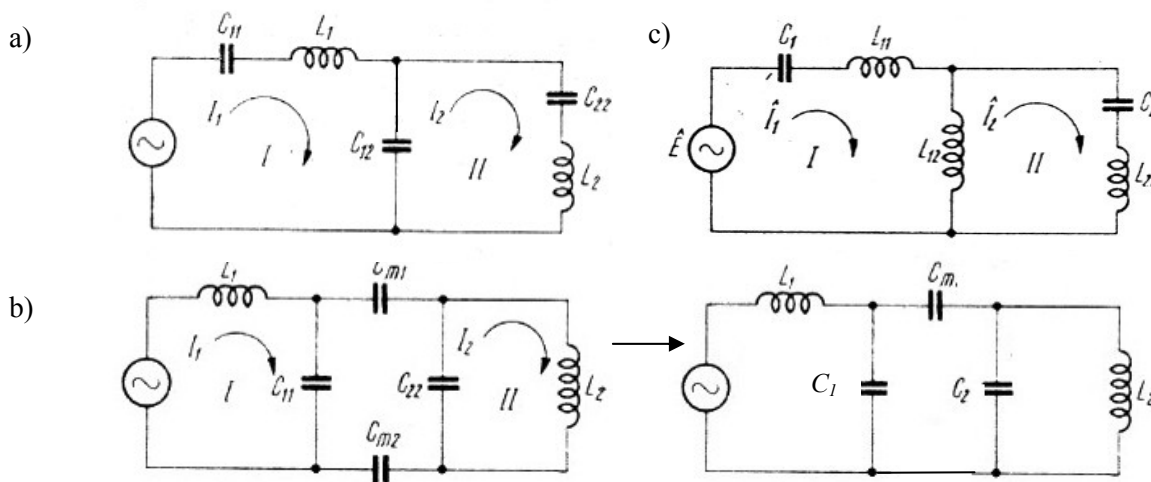
Dobroć obwodu równoległego z uwzględnieniem rezystancji wewnętrznej źródła R_w wynosi

$$Q' = \frac{R_w R_d}{R_w + R_d} = \frac{R'_d}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{Q}{1 + \frac{R_d}{R_w}} \quad (19)$$

Dołączenie do obwodu rezonansowego dwugałęźnego źródła rzeczywistego o oporze wewnętrznym R_w powoduje zmniejszenie dobroci obwodu. Aby nie spowodować pogorszenia selektywności obwodu równoległego rezystancja wewnętrzna źródła powinien być jak największa. W krańcowym przypadku źródła o zerowej rezystancji wewnętrznej obwód całkowicie traci swoje właściwości selektywne. Napięcie na obwodzie jest wtedy niezależne od częstotliwości.

2.4. Obwody rezonansowe sprzężone pojemnościowo

Dwa obwody elektryczne są sprzężone, jeżeli są połączone układem elektrycznym, przekazującym oddziaływanie tych obwodów na siebie. Najprostszymi obwodami sprzężonymi są obwody o wspólnej równoległej impedancji. Zależnie od rodzaju impedancji wyróżnia się sprzężenia: oporowe, indukcyjne, pojemnościowe oraz mieszane (indukcyjno-pojemnościowe). Na Rys. 10 pokazano przykłady obwodów sprzężonych indukcyjnie i pojemnościowo.



Rys.10. Przykłady obwodów sprzężonych a) sprzężenie pojemnościowe bezpośrednie, b) sprzężenie pojemnościowe pośrednie i wynik przekształcenia obwodu, c) sprzężenie indukcyjne bezpośrednie na wspólnej indukcyjności

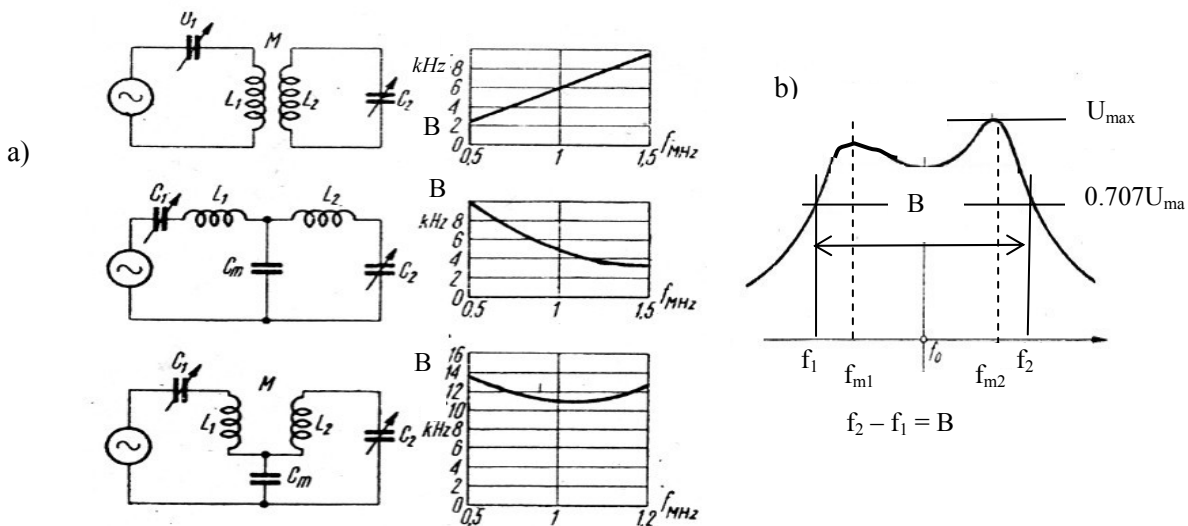
Sprzężenie pojemnościowe jest najczęściej spotykane w praktyce w urządzeniach odbiorczych. Sprzężenie pojemnościowe może być bezpośrednie lub pośrednie. Sprzężenie bezpośrednie jest tym słabsze im większą wartość posiada pojemność sprzężenia C_m oraz im większa jest częstotliwość. Sprzężenie pośrednie natomiast rośnie ze wzrostem pojemności sprzęgającej C_m . Przy sprzężeniu pojemnościowym bezpośrednim impedancja sprzężenia wynosi $Z_m = 1/j\omega C_m$, która maleje ze wzrostem częstotliwości. Sprzężenie pojemnościowe pośrednie można sprowadzić do bezpośredniego na zasadzie przekształcenia pokazanego na Rys.10b. Sprzężenie obwodów charakteryzuje współczynnik γ oraz wskaźnik sprzężenia a :

$$\gamma = \frac{Z_{mc}}{\sqrt{Z_{1C}Z_{2C}}}, \quad a = \gamma\sqrt{Q_1Q_2} \quad \text{gdzie } L_1=L_2=L, C_1=C_2=C, Q_1=Q_2 \text{ to } \gamma \approx \frac{C_m}{C} \quad (20)$$

gdzie Z_{mc} , Z_{1C} , Z_{2C} są składowymi charakterystycznymi odpowiednio impedancji sprzężenia Z_m , impedancji obwodu pierwotnego Z_{1C} i impedancji obwodu wtórnego Z_{2C} , Q_1 , Q_2 są współczynnikami dobroci obwodów. Zależnie od wartości wskaźnika sprzężenia uzyskuje się wypadkowe charakterystyki częstotliwościowe obwodów z jednym wierzchołkiem ($a \leq 1$, sprzężenia słabsze od krytycznego) lub z dwoma wierzchołkami ($a > 1$, sprzężenia silniejsze od krytycznego).

Krzywe rezonansowe obwodów sprzężonych pojemnościowo są asymetryczne, przy czym w zakresie częstotliwości mniejszych przebiegają one wyżej niż w zakresie częstotliwości większych.

W przypadku obwodów strojonych stosuje się sprzężenie mieszane indukcyjno-pojemnościowe. Można wtedy uzyskać symetryczne krzywe rezonansu (co jest szczególnie istotne w wejściowych strojonych obwodach odbiorczych) o prawie stałej szerokości pasma B przenoszonego w szerokim zakresie strojenia obwodów (Rys.11a).



Rys.11. a) przykłady obwodów sprzężonych stosowanych w urządzeniach odbiorczych
 b) charakterystyka dwóch obwodów sprzężonych przy sprężeniu ponad krytycznym $a > 1$

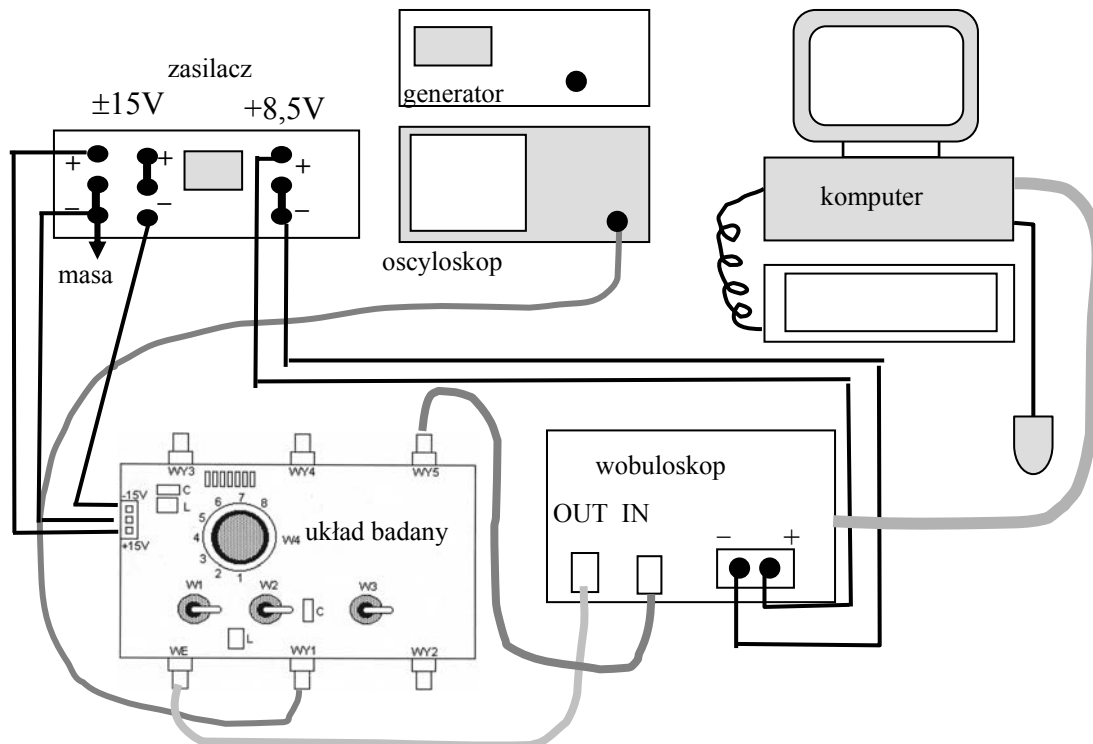
3. Opis układu badanego oraz pomiarowego

Układ badany zawiera dwa obwody rezonansowe: konfigurowany L1, C1 (szeregowy lub równoległy) oraz obwód równoległy nie konfigurowany L2, C2. Obwód szeregowy L1, C1 oraz obwód równoległy L2, C2 mogą być sprzężone pojemnościowo przez pojemności C3 – C9 załączane za pomocą przełącznika W4. Schemat ideowy badanego układu pokazano na Rys.12.

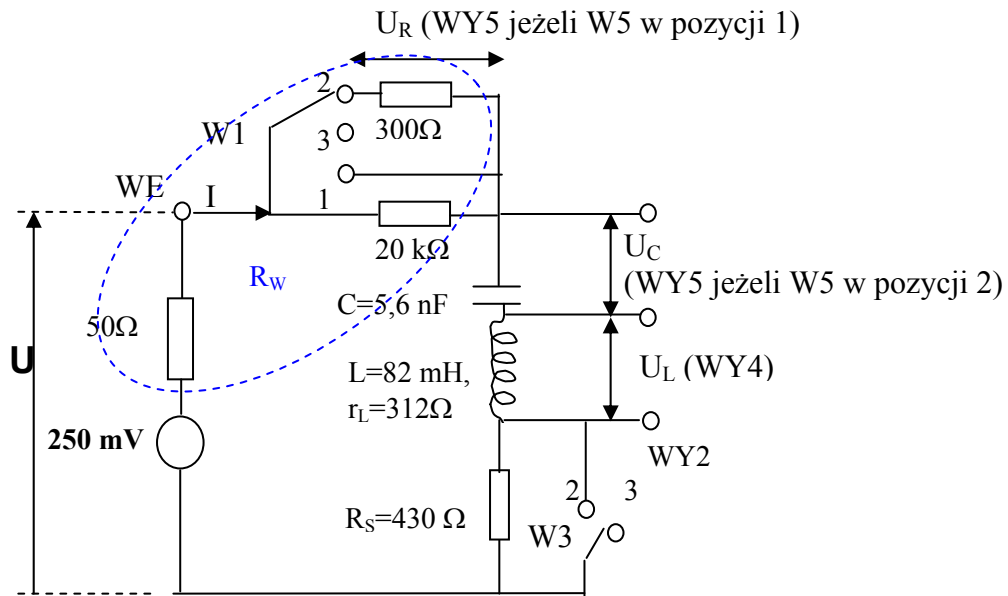
Przy ustawieniu przełącznika W2 w pozycji 2 jest realizowany układ rezonansowy szeregowy złożony z indukcyjności L1, pojemności C1 oraz rezystancji szeregowej R3. Za pomocą przełącznika W3 można zmieniać wypadkową wartość rezystancji szeregowej obwodu.

Przy ustawieniu przełącznika W2 w pozycji 1 jest realizowany układ rezonansowy równoległy złożony z indukcyjności L1, pojemności C1. Oporność wewnętrzną źródła można zwiększać za pomocą przełącznika W1.

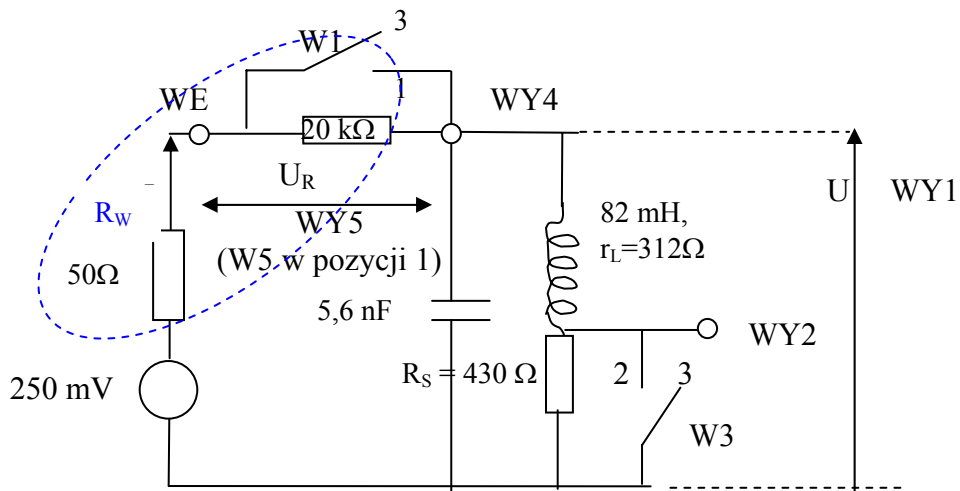
Schemat blokowy stanowiska pomiarowego pokazano na Rys.13.



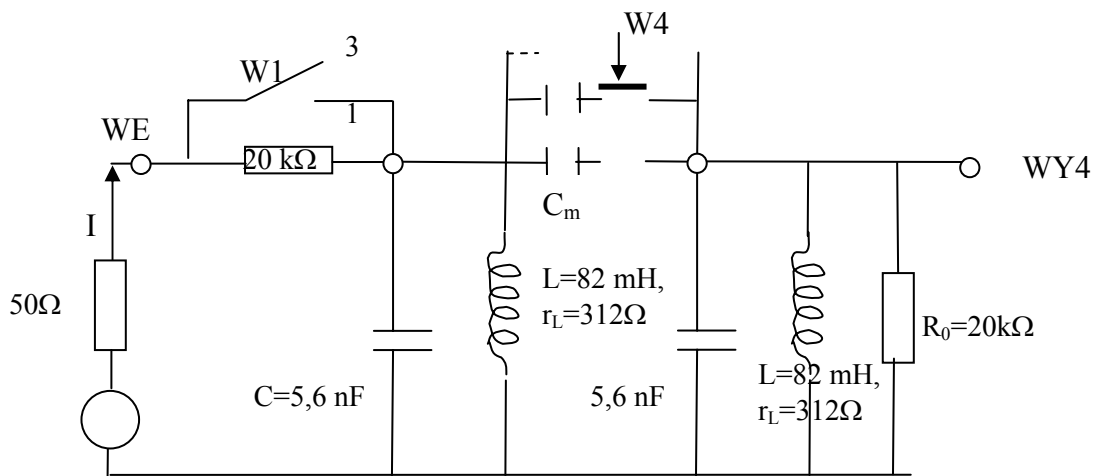
Rys.13. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego.



Rys.12b. Schemat obwodu szeregowego

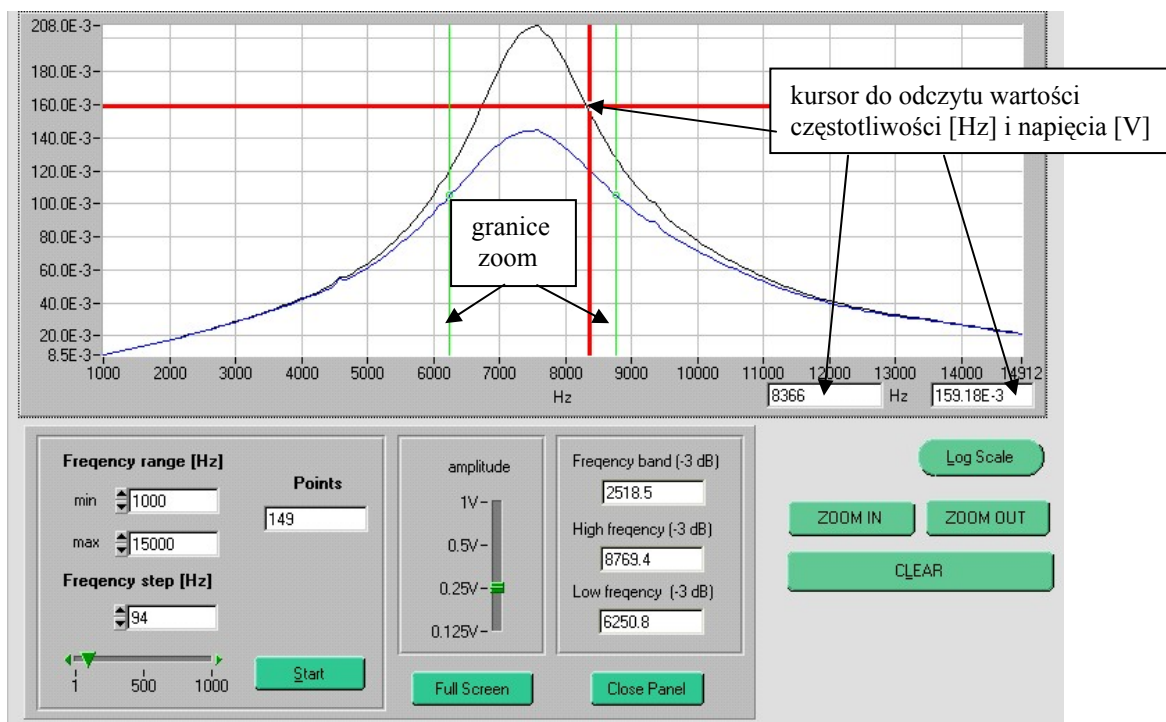


Rys.12c Schemat obwodu równoległego



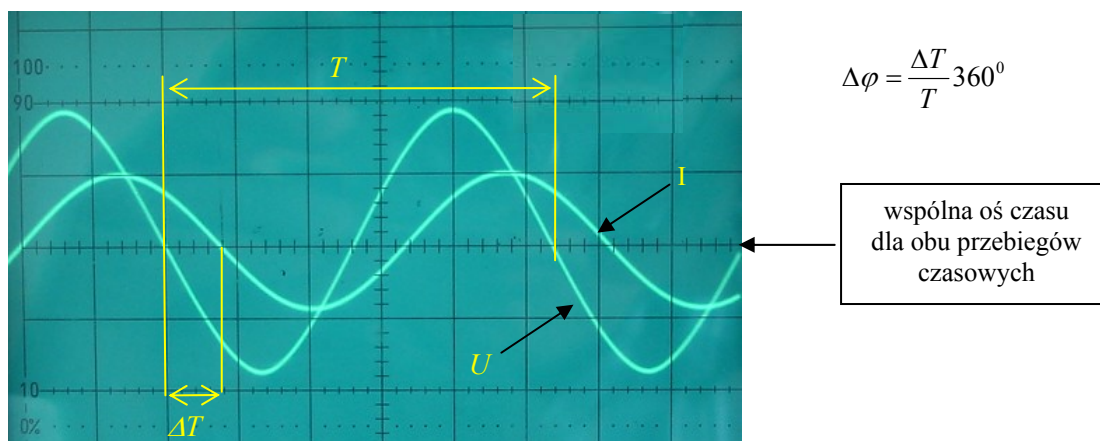
Rys.12d Schemat obwodów sprzężonych

Na wejście badanego układu jest podawany sygnał sinusoidalny z przestrajanego mikroprocesorowego wobuloscopu, obsługiwanego przez komputer. Natomiast sygnał z wyjścia układu badanego jest podawany na wejście wobuloscopu. Charakterystyki amplitudowe obwodów rezonansowych są wykreślane na ekranie monitora komputerowego (Rys.14).



Rys.14. Charakterystyki amplitudowe obwodu rezonansowego na ekranie monitora. Ustawiane parametry analizy: częstotliwość min, max, skok częstotliwości, poziom napięcia wejściowego, ZOOM IN (powiększenie wycinka obrazu w granicach wytyczonych przez zielone pionowe linie), CLEAR czyszczenie ekranu, START – start pomiaru, CLOSE PANEL – zamknięcie panelu, LOG SCALE – wykres w skali logarytmicznej.

Przesunięcie fazowe $\Delta\phi$ między przebiegiem napięcia na obwodzie a prądem jest mierzone za pomocą dwukanałowego oscyloskopu. Zasadę pomiaru objaśniono na Rys.15.

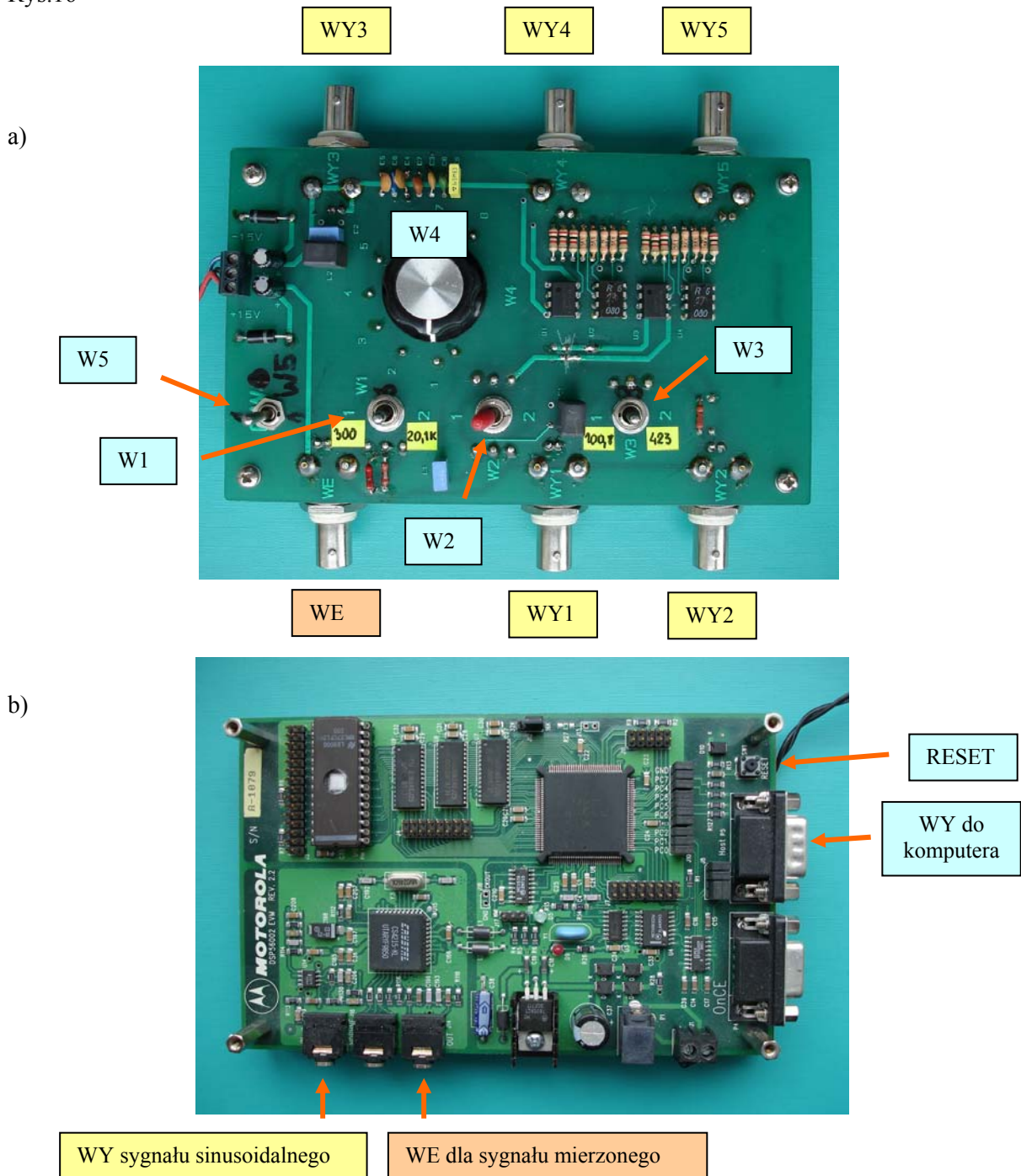


Rys.15. Widok przebiegów napięcia i prądu w obwodzie na ekranie oscyloskopu przesuniętych w fazie o wartość $\Delta\phi$

Źródłem sygnału pobudzającego obwód przy pomiarach przesunięcia fazy $\Delta\phi$ jest generator funkcyjny (Rys.16).



Rys.16



Rys.17. a) widok układu badanego, b) widok mikroprocesorowego wobuloskopu

4. Zadania do wykonania w domu

Zadanie 1

Obliczyć częstotliwość rezonansową f_r , szerokość pasma B , współczynnik dobroci Q_r oraz wartości przesunięcia fazowego $\varphi_Y(f_1)$ i $\varphi_Y(f_2)$ dla szeregowego obwodu rezonansowego, gdzie f_1 jest dolną a f_2 jest górną częstotliwością graniczną pasma obwodu. Złożyć schemat zastępczy obwodu:

- obliczyć B , f_r , Q_r dla $R_C = 662\Omega$, $L = 82\text{mH}$, $C = 5,6\text{nF}$
- obliczyć B , f_r , Q_r dla $R_C = 1092\Omega$, $L = 82\text{mH}$, $C = 5,6\text{nF}$
- obliczyć $\varphi_Y(f_1)$ i $\varphi_Y(f_2)$ dla $R_C = 1092\Omega$, $L = 82\text{mH}$, $C = 5,6\text{nF}$
(wzory 6, 7, 8, 9)

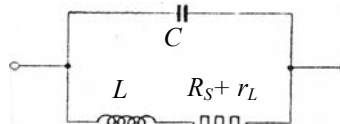


Obliczone wartości f_r , B i Q_r wpisać do tabeli 1, wartości $\varphi_Y(f_1)$ oraz $\varphi_Y(f_2)$ do tabeli 2.

Zadanie 2

Obliczyć częstotliwość rezonansową f_r , szerokość pasma B , współczynnik dobroci Q_r oraz wartości przesunięcia fazowego $\varphi_Z(f_1)$ i $\varphi_Z(f_2)$ dla równoległego dwugałęzowego obwodu rezonansowego, gdzie f_1 jest dolną a f_2 jest górną częstotliwością graniczną pasma obwodu. Złożyć schemat zastępczy obwodu:

- obliczyć B , f_r , Q_r dla $R_S+r_L = 312\Omega$
- obliczyć B , f_r , Q_r dla $R_S+r_L = 742\Omega$
- obliczyć B oraz $\varphi_Y(f_1)$ oraz $\varphi_Y(f_2)$ dla $R_S+r_L = 742\Omega$
(wzory 12-16, 18, 19)



Obliczone wartości f_r , B i Q_r wpisać do tabeli 3, wartości $\varphi_Y(f_1)$ oraz $\varphi_Y(f_2)$ do tabeli 4.

5. Literatura

- J. Osiowski, J. Szabatin, Podstawy teorii obwodów, t.2, WNT, Warszawa 1998, str. 143 – 186.
- J. Antoniewicz, Z. Majewski, Teoria obwodów, Podstawy radiotechniki, WKiŁ, Warszawa 1964
- S. Bolkowski, Teoria obwodów elektrycznych, WNT, Warszawa 1995, str. 150 - 168.

6. Przygotowanie do ćwiczenia i jego przebieg

Ćwiczenie jest wykonywane w zespołach **dwuosobowych**. Przed ćwiczeniem:

- należy przeczytać podstawy teoretyczne (podane w niniejszym opracowaniu) oraz wybraną literaturę do ćwiczenia.
- zespół wykonuje samodzielnie zadania domowe i przynosi je na ćwiczenie. Obliczone parametry obwodów rezonansowych należy wpisać do odpowiednich tabel w części B opracowania.

Na początku ćwiczenia jest sprawdzian wiadomości, który trwa 15 minut. Są to dwa lub jedno pytanie z zakresu ćwiczenia.

Przykładowe pytania na sprawdzianie:

- narysować przykładowe charakterystyki amplitudowe i fazowe obwodu rezonansowego szeregowego (lub równoległego) dla kilku różnych wartości współczynnika dobroci obwodu.
- narysować elektryczny schemat zastępczy obwodu rezonansowego szeregowego (lub równoległego) oraz wykresy wskazowe napięć i prądów w tym obwodzie.
- zdefiniować parametry obwodu rezonansowego szeregowego (lub równoległego): charakterystyka rezonansowa amplitudowa i fazowa, szerokość pasma, współczynnik dobroci
- jaką rezystancję wewnętrzną powinno posiadać źródło sygnału współpracujące z obwodem rezonansowym szeregowym (lub równoległym) - uzasadnić dlaczego.
- narysować przykładowe charakterystyki amplitudowe obwodów rezonansowych sprzężonych pojemnościowo dla kilku wartości współczynnika sprzężenia
- wpływ dobroci obu obwodów sprzężonych na kształt wypadkowej krzywej rezonansowej i szerokość pasma.

Przebieg ćwiczenia jest podany w części B opracowania, która jest jednocześnie protokołem z przebiegu ćwiczenia. Ćwiczenie jest oceniane na podstawie sprawdzianu, pracy domowej oraz protokołu z ćwiczenia.

CZĘŚĆ B

LABORATORIUM Obwodów i Sygnałów <i>ĆWICZENIE 3: Obwody rezonansowe</i>	
Zespół	Imię i Nazwisko:
	1.
	2.
Data:	

1. Badania obwodu rezonansowego szeregowego

Czynności wstępne

1. załączyć zasilanie układu badanego: MASA, +15V, -15V oraz wobuloskopu: MASA, +8V
2. ustawić przełączniki: **W2 w pozycji 2, W4 w pozycji 1, W5 w pozycji 1**
3. połączyć kablem koncentrycznym WY (OUT) wobuloskopu z WE układu pomiarowego
4. połączyć kablem koncentrycznym WE (IN) wobuloskopu z WY5 układu pomiarowego
5. sygnał z WY1 układu pomiarowego podać na kanał 2 oscyloskopu

Zadanie 1

*Zadanie polega na pomiarze krzywej rezonansowej obwodu szeregowego oraz wyznaczeniu jego parametrów: dobroci Q_R , oporu charakterystycznego ρ , wypadkowej rezystancji szeregowej R_C dla rezystancji wewnętrznej źródła sygnału $R_W = 350\Omega$ oraz dla dwóch wartości rezystancji szeregowej obwodu $R_S = 0\Omega$ i 430Ω . Krzywa rezonansowa jest wykreślana na ekranie wobuloskopu i jest to **wykres natężenia prądu I (napięcia U_R na rezystancji pomiarowej $R = 300\Omega$) w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego sinusoidalnie zmiennego U** . (patrz Rys.12b).*

1. wybrać zakres przemiatania częstotliwości wobuloskopu **od 1 KHz do 15 kHz**
2. ustawić napięcie na wyjściu wobuloskopu **250 mV**, skok częstotliwości **94 Hz**
3. wykreślić na monitorze charakterystykę dla $R_W = 350\Omega$ i $R_S = 0\Omega$ (**W1 w pozycji 2, W3 w pozycji 2**). W celu pomiaru wcisnąć klawisz START i poczekać na wykres krzywej rezonansowej. Następnie odczytać i zanotować w Tabeli 1:
 - a) różnicę częstotliwości $f_2 - f_1$ – odczyt w oknie „frequency band”
 - b) częstotliwość rezonansową f_r i odpowiadający jej poziom napięcia U_{Rmax} – odczyt w oknach pod wykresem (w tym celu ustawić środek czerwonego kursora na wierzchołku krzywej)
4. wykreślić na monitorze charakterystykę dla $R_W = 350\Omega$ i $R_S = 430\Omega$ (**W1 w pozycji 2, W3 w pozycji 3**). W celu pomiaru wcisnąć klawisz START i poczekać na wykres krzywej rezonansowej. Następnie odczytać i zanotować parametry krzywej tak jak w punktach 3a i 3b.

5. na podstawie pomiarów f_r, f_2, f_1 obliczyć: $\rho = 2\pi f_r L$ ($L = 82\text{mH}$), $C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L}$, $Q_r' = \frac{f_r}{f_2 - f_1}$

Uwaga: częstotliwości f_2 i f_1 są to częstotliwości powyżej i poniżej rezonansowej f_r , przy których napięcie U_R na rezystancji pomiarowej $R = 300\Omega$ wynosi $0,707 U_{Rmax}$ (patrz rys.12b)

6. Tabela 1. Wyniki pomiarów i obliczeń: $C[\text{nF}] =$ $\rho[\text{k}\Omega] =$

obliczenia

$R_C[\Omega] = R_W + R_S + r_L$	$U_{Rmax}[\text{mV}]$	$f_r[\text{kHz}]$	$B = f_2 - f_1 [\text{Hz}]$	Q_r'	$f_r[\text{kHz}]$	$B = f_2 - f_1 [\text{Hz}]$	Q_r'
662 $R_W = 350\Omega$ $R_S = 0\Omega$ $r_L = 312\Omega$							
1092 $R_W = 350\Omega$ $R_S = 430\Omega$ $r_L = 312\Omega$							

7. Wykreślić na monitorze charakterystykę dla $R_W = 20 \text{ k}\Omega$ (**W1 w pozycji 3**).

Objasnić wpływ rezystancji szeregowej R_S na parametry obwodu rezonansowego. Dlaczego źródło sygnału współpracujące z obwodem szeregowym powinno mieć małą rezystancję wewnętrzną R_W ?

Czy charakterystyki rezonansowe są symetryczne wokół częstotliwości rezonansowej? Jeżeli nie to wyjaśnić przyczyny asymetrii.

Zadanie 2

Wyznaczyć charakterystykę fazową szeregowego obwodu rezonansowego dla rezystancji wewnętrznej źródła sygnału $R_W = 350 \Omega$ oraz rezystancji szeregowej obwodu $R_S = 430 \Omega$ (**W3 w pozycji 3, W1 w pozycji 2, W5 w pozycji 1**). Charakterystyka fazowa jest to wykres przesunięcia fazy między przebiegiem prądu I płynącego przez obwód i przebiegiem napięcia wejściowego U , w funkcji częstotliwości.

W celu wyznaczenia charakterystyki fazowej obwodu należy:

1. **odłączyć wobuloskop (kable koncentryczne) od układu pomiarowego! Załączyć tłumik -20 dB na wyjściu generatora funkcyjnego (wcisnąć przycisk Attenuator), ustawić wskaźnik na odczyt napięcia V_{pp} , pokrętką „Amplitude” ustawić poziom napięcia $V_{pp} = 7,6 \text{ V}$**
2. **podać sygnał sinusoidalnie zmienny U z generatora na wejście WE układu pomiarowego oraz na kanał 1 oscyloskopu.** Połączyć kablem koncentrycznym WY5 układu pomiarowego z WE kanału 2 oscyloskopu. Ustawić wartość częstotliwości f_r z Tabeli 1. Pokrętką strojenia zmieniać **powoli częstotliwość generatora wokół ustawionej wartości f_r aż do uzyskania na WY5 (na oscyloskopie) maksimum napięcia U_R (maksimum prądu I płynącego przez obwód). Zanotować tę częstotliwość $f_r = \dots\dots\dots \text{ Hz}$, i odpowiadające jej napięcie $U_{Rmax} = \dots\dots\dots \text{ mV}$.**

Dobrać wzmocnienia w obu kanałach oscyloskopu tak, aby oglądane przebiegi U oraz U_R posiadały podobne wartości amplitud. Nałożyć oba przebiegi na siebie tak, aby pokrywały się ich skale czasu (**patrz Rys.15**). W tym celu sprawdzić zerowanie skal napięcia w obu kanałach przez ustawienie *wejścia GND*. Jeżeli na ekranie są widoczne dwie poziome linie to należy je sprowadzić **dokładnie** na środek ekranu za pomocą pokręteł regulacji poziomu tak, aby pokryły się. Ustawić dla obu kanałów *wejścia AC*.

3. zaobserwować przesunięcie przebiegu napięcia U_R na WY5 (na rezystancji pomiarowej $R = 300 \Omega$) względem przebiegu napięcia U na WE obwodu rezonansowego w funkcji częstotliwości.
4. zmierzyć na oscyloskopie przesunięcie fazy $\Delta\varphi$ między U i U_R dla częstotliwości f_r oraz poniżej i powyżej rezonansu. W tym celu zmierzyć okres T przebiegu napięciowego U oraz przesunięcie ΔT między przebiegami U i U_R na skali czasu (w działkach). Szukane przesunięcie fazy wynosi:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T}{T} 360^\circ$$

Wyniki pomiarów zamieścić w Tabeli 2. **Uwaga: częstotliwości f_2 i f_1 są to częstotliwości powyżej i poniżej rezonansowej f_r , przy których napięcie U_R na rezystancji pomiarowej $R = 300 \Omega$ wynosi $0,707 U_{Rmax}$ (patrz rys.12b)**

Tabela 2. $R_W = 350\Omega$, $R_S = 430\Omega$, $r_L = 312\Omega$, $R_C = 1092\Omega$ (**W3** w pozycji 3, **W1** w pozycji 2)

	$f < f_1$	$f = f_1$	$f_r > f > f_1$	$f = f_r$	$f_r < f < f_2$	$f = f_2$	$f > f_2$
f [Hz]							
$\Delta\varphi$ [deg]							
φ_Y [deg]							

częstotliwości mniejsze od f_{R0}

częstotliwości większe od f_{R0}

Podać znak $\Delta\varphi$ przy częstotliwościach większych oraz mniejszych od rezonansowej. Porównać zmierzone wartości $\Delta\varphi$ z teoretycznymi φ_Y i uzasadnić różnice. Czy wartości $\Delta\varphi$ zmierzone przy $f=f_1$ oraz $f=f_2$ są jednakowe? Jeżeli nie to wyjaśnić przyczyny asymetrii. Oszacować błąd pomiaru fazy $\Delta\varphi$.

Jaki charakter (pojemnościowy czy indukcyjny) posiada obwód rezonansowy szeregowy przy częstotliwościach większych oraz mniejszych od rezonansowej i dlaczego? Jaki charakter posiada impedancja obwodu przy częstotliwości rezonansowej?

Zadanie 3

Zmierzyć przesunięcie fazy między napięciami U_C i U_L oraz wartości tych napięć przy częstotliwości rezonansowej. W tym celu należy ustawić **W5** w pozycji 2 a następnie podać sygnał z WY4 (cewka) na kanał 1 a sygnał z WY5 (kondensator) podać na kanał 2 oscyloskopu.

Jaka jest wypadkowa wartość napięcia na zaciskach obwodu szeregowego przy częstotliwości rezonansowej? Ile wynosi wówczas impedancja obwodu?

2. Badania obwodu rezonansowego równoległego

Czynności wstępne

1. ustawić przełączniki: **W2** w pozycji 1, **W4** w pozycji 1, **W5** w pozycji 2
2. połączyć kablem koncentrycznym WY (OUT) wobuloskopu z WE układu pomiarowego
3. połączyć kablem koncentrycznym WE (IN) wobuloskopu z WY5 układu pomiarowego
4. sygnał z WY1 **przez sondę** podać na kanał 1 oscyloskopu

Zadanie 1

Zadanie polega na pomiarze krzywej rezonansowej obwodu równoległego oraz wyznaczeniu jego parametrów: dobroci Q_r , oporu dynamicznego R_d dla rezystancji wewnętrznej źródła sygnału $R_W = 20\text{ k}\Omega$ i dwóch wartości rezystancji w gałęzi indukcyjnej $R_S = 0$ i 430Ω . **Krzywa rezonansowa obwodu jest wykreślana na ekranie wobuloskopu i jest to przebieg napięcia U na obwodzie w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego (patrz Rys.12c).**

W celu obserwacji krzywej rezonansowej obwodu należy:

1. wybrać zakres przemiataania częstotliwości wobuloskopu **od 1 kHz do 15 kHz**
2. ustawić napięcie wy wobuloskopu **250 mV**, skok częstotliwości ok. **94 Hz**
3. wykreślić na monitorze charakterystykę dla $R_w = 20k\Omega$ i $R_s = 0\Omega$ (**W1 w pozycji 3, W3 w pozycji 2**).
W celu pomiaru wcisnąć klawisz START i poczekać na wykres krzywej rezonansowej. Następnie odczytać i zanotować w Tabeli 3
 - a) różnicę częstotliwości $f_2 - f_1$ – odczyt w oknie „frequency band”
 - b) częstotliwość rezonansową f_r i odpowiadający jej poziom napięcia U_{max} – odczyt w oknach pod wykresem (w tym celu ustawić środek czerwonego kursora na wierzchołku krzywej)
4. wykreślić na monitorze charakterystykę dla $R_w = 20k\Omega$ i $R_s = 430\Omega$ (**W1 w pozycji 3, W3 w pozycji 3**).
W celu pomiaru wcisnąć klawisz START i poczekać na wykres krzywej rezonansowej. Następnie odczytać i zanotować parametry krzywej tak jak w punktach 3a i 3b.
5. na podstawie pomiarów f_r, f_2, f_1 obliczyć:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L}, \quad (L = 82mH) \quad R_d = \frac{L}{C(r_L + R_s)}, \quad (r_L = 312\Omega) \quad Q_r' = \frac{f_r}{f_2 - f_1}$$

6. Tabela 3: wyniki pomiarów i obliczeń: C[nF]=

obliczenia

$R_s + r_L [\Omega]$	$R_d [k\Omega]$	$f_r [Hz]$	$B = f_2 - f_1 [Hz]$	Q_r'	$f_r [Hz]$	$B = f_2 - f_1 [Hz]$	Q_r'
312							
$U_{RMAX} =$							
742							
$U_{RMAX} =$							

7. Wykreślić na monitorze charakterystykę dla $R_w = 50\Omega$ (**W1 w pozycji 1**).

Objasnić wpływ rezystancji szeregowej R_s na parametry obwodu rezonansowego. Dlaczego źródło sygnału współpracujące z obwodem równoległym powinno mieć dużą rezystancję wewnętrzną R_w ?

Czy charakterystyki rezonansowe są symetryczne wokół częstotliwości rezonansowej? Jeżeli nie to wyjaśnić przyczyny asymetrii.

Zadanie 2

*Wyznaczyć charakterystykę fazową równoległego obwodu rezonansowego dla $R_w = 20k\Omega$ i $R_s = 430\Omega$ (**W1 w pozycji 3, W3 w pozycji 3, W5 w pozycji 1**). Charakterystyka fazowa obwodu jest to wykres przesunięcia fazy między przebiegiem prądu I (napięcia U_R na rezystancji pomiarowej $R = 20k\Omega$) płynącego przez obwód i przebiegiem napięcia na obwodzie U , w funkcji częstotliwości.*

W tym celu należy:

1. **odłączyć wobuloskop (kable koncentryczne) od układu pomiarowego! Załączyć tłumik -20 dB** na wyjściu generatora funkcyjnego (wcisnąć przycisk Attenuator), ustawić wskaźnik na odczyt napięcia V_{pp} , pokrętkiem „Amplitude” ustawić poziom napięcia $V_{pp} = 7,6V$.
2. **podać sygnał sinusoidalnie zmienny z generatora na wejście WE układu pomiarowego.** Podać przez sondę sygnał U z WY1 układu pomiarowego na kanał 2 oscyloskopu, a sygnał U_R z WY5 – **kablem koncentrycznym** na kanał 1 oscyloskopu. Ustawić wartość częstotliwości f_r z Tabeli 3.

Zmieniać powoli częstotliwość generatora wokół ustawionej wartości f_r aż do uzyskania na WY1 (na oscyloskopie) maksimum napięcia U . Zanotować tę częstotliwość jako

$f_r = \dots\dots\dots \text{Hz}$ i odpowiadające jej napięcie $U_{\max} = \dots\dots\dots \text{mV}$.

Nałożyć przebiegi U i U_R na siebie tak, aby pokrywały się ich skale czasu (sprawdzić zerowanie skal napięcia w obu kanałach przez ustawienie wejścia GND). Dobrać wzmocnienia w obu kanałach tak, aby oglądane przebiegi posiadały podobne wartości amplitud. Ustawić dla obu kanałów wejścia AC.

3. zaobserwować przesunięcie przebiegu napięcia U na obwodzie rezonansowym na WY1 względem przebiegu napięcia U_R na WY5 (na rezystancji $R = 20\text{k}\Omega$) w funkcji częstotliwości.
4. zmierzyć na oscyloskopie przesunięcie fazy $\Delta\varphi$ między U i U_R dla częstotliwości f_{r0} oraz poniżej i powyżej rezonansu. W tym celu zmierzyć okres T przebiegu napięciowego U oraz przesunięcie ΔT między przebiegami U i U_R na skali czasu (w działkach). Szukane przesunięcie fazy wynosi:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T}{T} 360^\circ$$

5. Tabela 4 - wyniki pomiarów i obliczeń.

	$f < f_1$	$f = f_1$	$f_r > f > f_1$	$f = f_{r0}$	$f_r < f < f_1$	$f = f_2$	$f > f_2$
f [Hz]							
$\Delta\varphi$ [deg]							
φ_Y [deg]							

częstotliwości mniejsze od f_{r0}

częstotliwości większe od f_{r0}

Podać znak przesunięcia fazowego przy częstotliwościach większych oraz mniejszych od rezonansowej. Porównać wartości $\Delta\varphi$ zmierzone przy $f=f_1$ oraz $f=f_2$ z teoretycznymi i uzasadnić różnice. Czy wartości $\Delta\varphi$ zmierzone przy $f=f_1$ oraz $f=f_2$ są jednakowe? Jeżeli nie to wyjaśnić przyczyny asymetrii.

Jaki charakter (pojemnościowy czy indukcyjny) posiada obwód rezonansowy równoległy przy częstotliwościach większych oraz mniejszych od rezonansowej i dlaczego?

Jaki charakter posiada impedancja obwodu przy częstotliwości rezonansowej?

3. Badanie obwodów rezonansowych sprzężonych pojemnościowo

Czynności wstępne

- ustawić przełączniki:
 - W1 w pozycji 3
 - W2 w pozycji 1
 - W3 w pozycji 2
 - W4 w pozycji 2
- połączyć kablem koncentrycznym WY (OUT) wobuloskopu z WE układu pomiarowego
- połączyć kablem koncentrycznym WE (IN) wobuloskopu z WY3 układu pomiarowego
- sygnał z WY4 układu pomiarowego podać na kanał 1 (CH1) oscyloskopu

Zadanie 1

Badane są obwody ze sprzężeniem bezpośrednim za pomocą pojemności C_m przełączanych przełącznikiem W4 (patrz Rys.12d). Obwód pierwotny oraz wtórny są obwodami rezonansowymi równoległymi. Należy:

- obejrzeć na ekranie wobuloskopu charakterystyki częstotliwościowe obwodów przy różnych wartościach pojemności sprzęgającej C_m .
- dla krzywych ze sprzężeniem podkrytycznym i krytycznym zmierzyć częstotliwości maksimum krzywych f_{max} oraz szerokość pasma B; dla krzywych ze sprzężeniem nadkrytycznym zmierzyć częstotliwości maksimum f_{m2} , f_{m1} oraz szerokość pasma B
- Obliczyć wartości wskaźników sprzężenia. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 5.

Tabela 5

C_m [pF]	680	1500	2200	3600	4700
W4	2	4	5	6	7
$Q\gamma=QC_m/C$					
f_{max} [kHz]					
f_{m2} [kHz]					
f_{m1} [kHz]					
B [kHz]					

Opisać wpływ sprzężenia na kształt krzywych rezonansowych, podać przyczyny asymetrii krzywych.

Skomentować wpływ sprzężenia na wartości częstotliwości f_{max} , f_{m1} i f_{m2} obwodów sprzężonych w porównaniu z częstotliwością pojedynczego obwodu.