

Ćwiczenie: A4

Tytuł ćwiczenia: Rezonanse elektryczne

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zachowania kombinacji elementów R , L , i C w słabo tłumionych obwodach szeregowych i równoległych prądu zmiennego, oraz zrozumienie jak zawady L i C znoszą się w szczególnych warunkach, wykazując jedynie opór omowy. Wyznaczony zostanie także współczynnik dobroci obwodów.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

1. Pomiar zawady obwodu szeregowego RLC w funkcji częstotliwości.
2. Pomiar przesunięcia fazowego w obwodzie szeregowym w funkcji częstotliwości.
3. Wyznaczenie współczynnika dobroci obwodu szeregowego.
4. Pomiar zawady obwodu równoległego RLC w funkcji częstotliwości.
5. Pomiar przesunięcia fazowego w obwodzie równoległym w funkcji częstotliwości.
6. Wyznaczenie współczynnika dobroci obwodu równoległego.

III. Zagadnienia do kolokwium

1. Opór elektryczny metali i półprzewodników.
2. Obwody elektryczne, prawo Ohma, prawa Kirchhoffa.
3. Teoria prądu zmiennego, opór cewki i kondensatora
4. Rezonanse elektryczne.
5. Mostkowe metody pomiaru oporu elektrycznego R , indukcyjności L i pojemności C .

IV. Wykaz urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

W skład zestawu aparatury pomiarowej wchodzi:

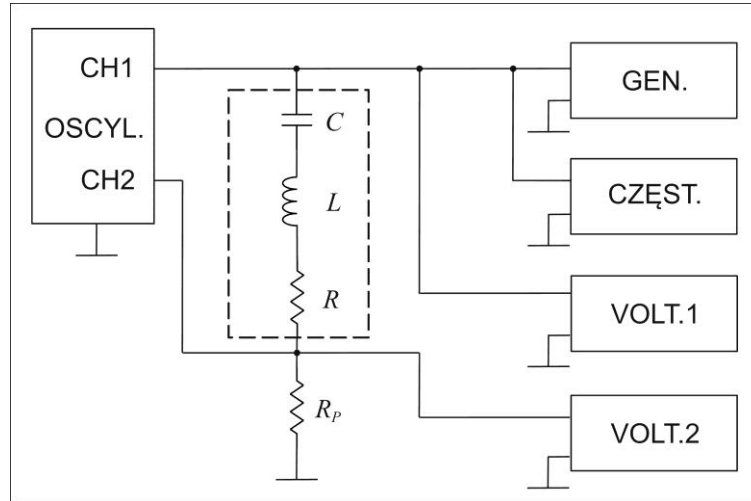
1. zestaw oporników R , R_S , R_P o wartościach 1Ω , 10Ω , 100Ω , 1000Ω , $10\ 000\Omega$ i $100\ 000\Omega$,
2. zestaw kondensatorów C z pojemnościami $0,1\ \mu F$, $0,33\ \mu F$, $0,47\ \mu F$ i $1\ \mu F$,
3. cewki L na toroidalnym żelaznym rdzeniu:
A) z indukcyjnością $2,5H$ i oporem omowym uzwojenia $43,3\Omega$,
B) z indukcyjnością $18mH$ i oporem omowym $0,18\Omega$,
4. cewki L na rdzeniach ferrytowych:
C) z indukcyjnością $10mH$ i oporem omowym uzwojenia ... Ω , oraz
D) z indukcyjnością $1mH$ i oporem omowym ... Ω .
5. GEN. - generator mocy PO-26
6. CZĘST. - częstotściomierz PFL-30
7. VOLT.1, VOLT.2 - miliwoltomierze napięcia zmiennego VM-1526,
8. OSCYL. - oscyloskop dwukanałowy DF4321C,
9. płyta montażowa z gniazdami typu „bananowe”,
10. jednożyłowe kable z wtyczkami bananowymi do łączenia elementów obwodu,
11. ekranowane kable z wtykiem BNC i bananowymi do podłączenia miliwoltomierzy,
12. sondy pomiarowe oscyloskopu,
13. kabel BNC z tłumikiem 10:1 do podłączenia częstotściomierza.
14. trójniki BNC.

V. Wykonanie ćwiczenia

(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

1. Pomiar krzywej rezonansowa i przesunięcia fazowego w obwodzie szeregowym.

Zestawić obwód według Rys.1.



Rys. 1. Schemat połączeń podczas pomiaru charakterystyk częstotściowych szeregowego obwodu RLC

Ustawienie generatora PO-26, Rys. 2.

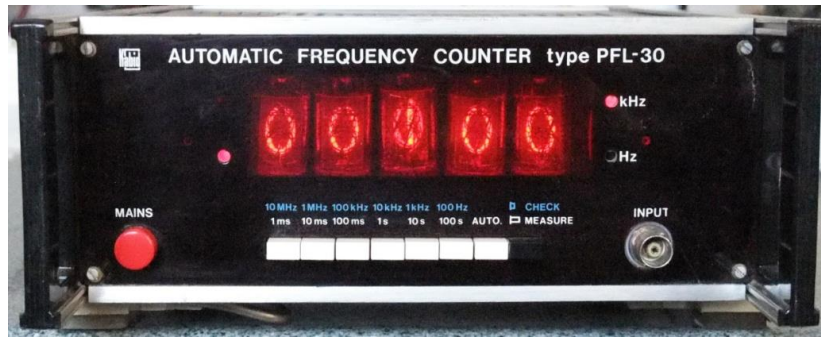


Rys. 2. Fotografia generatora PO-26.

1. Sprawdzić czy klawisz POWER jest wciśnięty, jeśli nie – należy wycisnąć.
2. Włożyć kabel sieciowy do gniazdka z bolcem ochronnym.
3. Przełącznik VOLTAGE ADJ. ustawić na 6.5V/1.6A.
4. Wcisnąć klawisz OUT 2 oraz wcisnąć klawisz mnożnika częstotści na x10Hz.
5. Pokrętko tarczy nastawy częstotści ustawić na 100.
6. Podłączyć kable do wyjścia OUT 2.
7. Wcisnąć klawisz POWER.

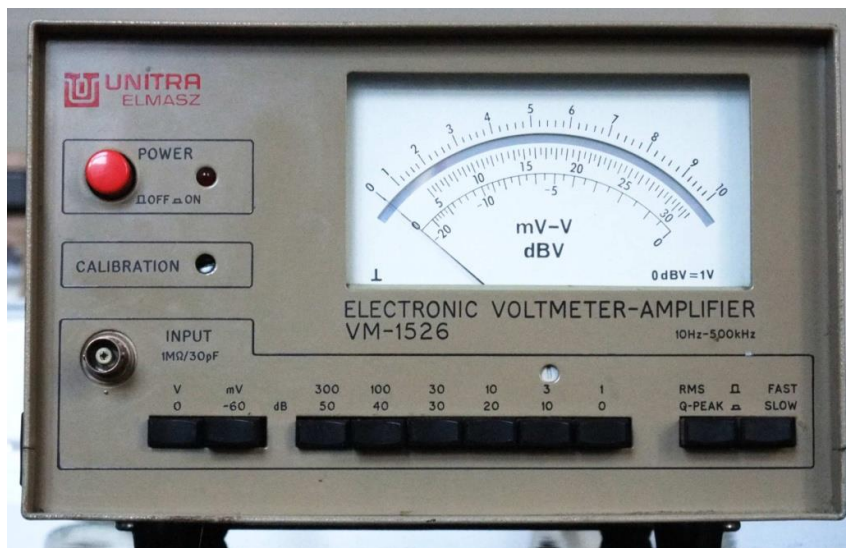
Ustawienie częstotściomierza PFL-30, Rys. 3.

1. Sprawdzić czy klawisz MAINS jest wciśnięty, jeśli nie – należy wycisnąć.
2. Włożyć kabel sieciowy do gniazdka z bolcem ochronnym.
3. Wcisnąć klawisz AUTO
4. Klawisz CHECK/MEASURE pozostawić wciśnięty
5. Wcisnąć klawisz 10kHz/1s
6. Podłączyć kabel z tłumikiem sygnału 10:1 do wejścia INPUT
7. Wcisnąć klawisz MAINS



Rys. 3. Fotografia częstościomierza PFL-30.

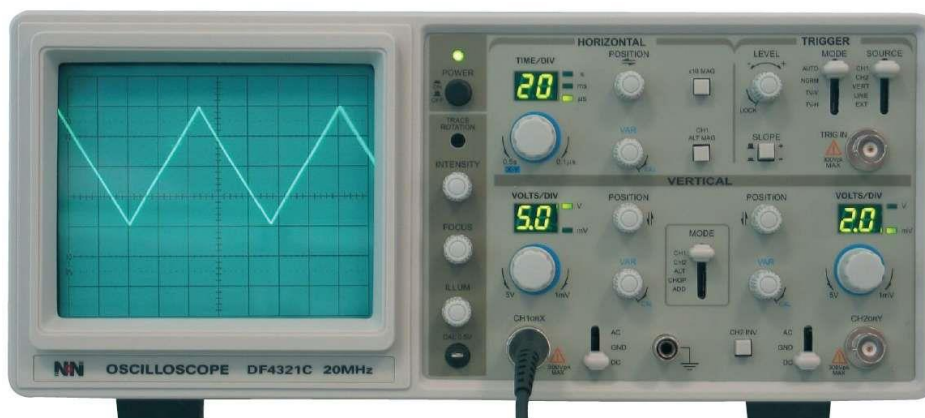
Ustawienie miliwoltomierza VM-1526, Rys. 4.



Rys. 4. Fotografia miliwoltomierza VM-1526.

1. Sprawdzić czy klawisz POWER jest wyciśnięty, jeśli nie – należy wycisnąć.
2. Włożyć kabel sieciowy do gniazdka z bolcem ochronnym.
3. Wcisnąć klawisz V/0, klawisz czułości 10/20 oraz klawisz RMS/Q-PEAK
4. Wcisnąć klawisz FAST/SLOW
5. Podłączyć kabel do wejścia INPUT
6. Włączyć klawisz POWER

Ustawienie oscyloskopu DF4321C, Rys. 5.

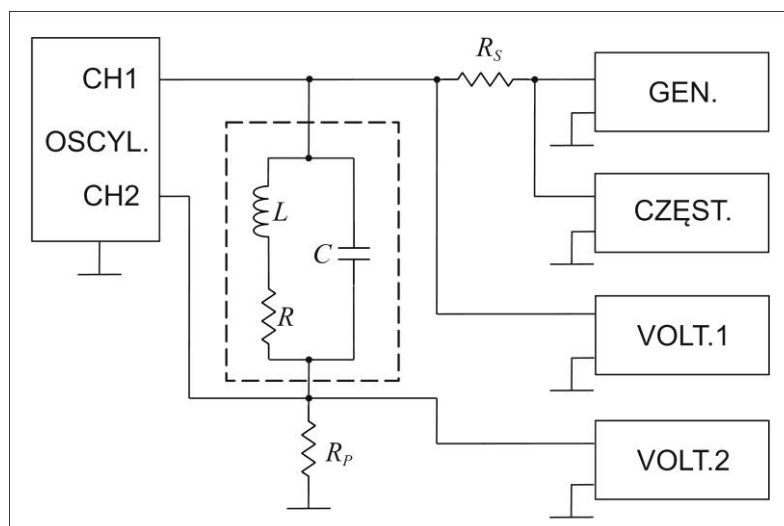


Rys. 5. Oscyloskop dwukanałowy DF4321C.

1. Sprawdzić czy klawisz POWER jest wyciśnięty, jeśli nie – należy wycisnąć.
2. Włożyć kabel sieciowy do gniazdka z bolcem ochronnym.
3. Ustawić oscyloskop
 - a. Przełącznik MODE ustawić na ALT
 - b. Przełącznik obok wejścia CH1 ustawić na AC
 - c. Przełącznik obok wejścia CH2 ustawić na GND
 - d. Przełącznik TRIGGER MODE ustawić na AUTO
 - e. Przełącznik TRIGGER SOURCE ustawić na CH1
 - f. Przełącznik TIME/DIV kanału pierwszego ustawić na 20 ms
4. Wcisnąć klawisz POWER
 - a. Przełącznikami VOLT/DIV kanału pierwszego CH1 i drugiego CH2 wybrać czułość 5V
5. do wejścia 1-go kanału pomiarowego oscyloskopu należy podłączyć za pomocą sondy pomiarowej sygnał z generatora,
6. do wejścia 2-go kanału podłączyć za pomocą sondy pomiarowej sygnał napięciowy z opornika R_p .
 - a. Przełącznikiem VOLT/DIV kanału pierwszego wybrać czułość tak aby wykres zmian napięcia na ekranie oscyloskopu mieściła się w zakresie 50%-90% wysokości ekranu
 - b. Przełącznik TIME/DIV i pokrętko VAR kanału pierwszego dokładnie ustawić tak aby na ekranie mieścił wykres jednego pełnego okresu zmian napięcia
 - c. Przełącznik TRIGGER MODE ustawić na NORM
 - d. Pokrętką LEVEL ustawić napięcie wyzwolenia tak aby na ekranie pojawiła się sinusoidalny wykres sygnału rozpoczynający się od fazy równej 0
 - e. Przełącznik obok wejścia CH2 ustawić na AC
 - f. Przełącznikami VOLT/DIV kanału drugiego wybrać czułość tak aby wykres zmian napięcia na ekranie oscyloskopu mieściła się w zakresie 50%-90% wysokości ekranu
 - g. Odczytać przesunięcie sygnały kanału 2 względem sygnału kanału 1 w działkach ekranu, notując znak przesunięcia: - w prawo, + w lewo.

2. Pomiar krzywej rezonansowa i przesunięcia fazowego obwodu równoległego.

Zestawić obwód według Rys.6.



Rys. 6. Schemat połączeń podczas pomiaru charakterystyk częstotliwościowych równoległego obwodu RLC

Ustawienie generatora PO-26

Należy ustawić tak jak podczas pomiarów obwodu szeregowego, z wyjątkiem punktu 3) gdzie należy przełącznik VOLTAGE ADJ. ustawić na 65V/0.16A.

Ustawienie częstotliwościomierza PFL-30

Należy ustawić tak jak podczas pomiarów obwodu szeregowego.

Ustawienie miliwoltomierzy VM-1526

Należy ustawić tak jak podczas pomiarów obwodu szeregowego, z wyjątkiem punktu 4) gdzie należy przełącznik czułości ustawić w miliwoltomierzu VOLT.1 ustawić na 100/10.

Ustawienie oscyloskopu DF4321C.

Należy ustawić tak jak podczas pomiarów obwodu szeregowego.

3. Uwagi do wykonania ćwiczenia

Osoba prowadząca zajęcia może wskazać wykonanie wszystkich bądź wybranych pomiarów oraz wskazać, jakie zestawy elementów *RLC* mają tworzyć obwody i jakie są wartości oporu, indukcyjności i pojemności. Podana zostanie także wartość oporu omowego cewek.

4. Zasady wykonywania pomiarów charakterystyk częstotściowych.

- Przed przystąpieniem do pomiarów obliczyć teoretyczną częstotliwość rezonansową f obwodu *RLC*,
- Ustalić zakres przestrajania częstotliwości generatora od $f/5$ do $5 \times f$
- Rejestrować napięcia mierzone miliwoltomierzami VOLT.1 i VOLT.2 w funkcji częstotliwości.
- Wielkość zmiany częstotliwości a zatem i liczba punktów pomiarowych powinny wynikać przyjętego kompromisu pomiędzy dokładnością a czasochłonnością. W praktyce, w przypadku tego ćwiczenia, należy zmieniać częstotliwość tak, aby zmiana sygnału pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi, mierzona miliwoltomierzem VOLT.2, nie przekraczała 5% a zmiany częstotliwości nie były większe niż $1/50$ jej wartości.
- W tabeli należy notować wskazania częstotliwości odczytane z częstotściomierza, napięcie wskazane przez miliwoltomierz VOLT.1, napięcie wskazane przez miliwoltomierz VOLT.2 oraz przesunięcie fazowe wyrażone w działkach odczytanych z ekranu oscyloskopu.
- Warto pamiętać, że w opisie doświadczenia miliwoltomierze są ustawiane do pomiaru napięcia szczytowego a nie skutecznego.

Po wykonanych pomiarach rozłączyć wszystkie elementy układu i odłączyć urządzenia od sieci elektrycznej.

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy**1. Opracowanie wyników pomiarowych.**

Korzystając z danych zapisanych podczas pomiarów należy wykonać obliczenia przewodności pozornej obwodu szeregowego i zawady obwodu równoległego a także przesunięcia fazowego w każdym z obwodów. W instrukcji znajdują się odnośniki do wzorów znajdujących się w materiałach uzupełniających na końcu opracowania.

Wyniki pomiarów i obliczeń powinny być zestawione w tabeli, jak pokazuje Tabela 1.

Obliczenia przewodności pozornej obwodu szeregowego.

Wzór (7) zakłada stałą, niezależną od częstości amplitudę napięcia źródła prądu. Jeśli ten warunek, z powodu dużej przewodności pozornej, nie jest spełniony i amplituda napięcia na wyjściu generatora w pobliżu częstości rezonansowej maleje, wówczas należy dokonać normalizacji przewodności pozornej do stałej amplitudy napięcia.

Obliczenia zawady obwodu równoległego.

Wzór (12) zakłada stałą amplitudę źródła prądu. Jeśli ten warunek, z powodu dużej zawady, nie jest spełniony i amplituda prądu dostarczanego przez generator maleje w pobliżu częstości rezonansowej, wówczas należy dokonać normalizacji obliczeń zawady do stałej amplitudy prądu.

Obliczenia przesunięcia fazowego obwodów szeregowego i równoległego.

Wartość przesunięcia fazowego równa jest stosunkowi liczby działek przesunięcia krzywych sinusoidalnych na ekranie oscyloskopu do liczby działek na całym ekranie, wynoszącej 50, pomnożonemu przez 2π . Tak wyliczone przesunięcie fazowe jest wyrażone w radianach. Należy pamiętać o zachowaniu znaku przesunięcia, opisanego w p. 3.3 w materiałach uzupełniających.

Tabela. 1 (wpisać rodzaj obwodu i wartości elementów *RLC*).

Nr. pomiaru	f [Hz]	$\log(f)$	V_1 [V]	V_2 [V]	s [działki]	$Y \left[\frac{1}{\Omega} \right]$ lub Z [Ω]	$Y \left[\frac{1}{\Omega} \right]$ lub Z [Ω] znormalizowane	φ [rad.]
1								
2								
3								

2. Wykonanie sprawozdania (raportu z ćwiczenia)**Wykresy**

Obliczone przewodności pozorne, zawady i przesunięcia fazowe należy przedstawić w formie wykresów, jako zależne od logarytmu częstości. Preferowanym programem do wykonania wykresów jest Matlab lub Gnuplot. Wykresy powinny być wykonane na kartkach papieru formatu A4 ustawionych poziomo. Osie wykresów powinny mieć rozmiary 20cm x12 cm.

W celu obliczenia współczynników dobroci należy wykonać wykresy przewodności pozornej i zawady w ograniczonym zakresie zmian częstości. W tym celu na wykresach należy przedstawić jedynie te wartości Y i Z , które są większe niż około 30% wartości maksymalnej a następnie, zgodnie ze wzorem (15) zaznaczyć częstości f_1 i f_2 , odczytać je i obliczyć Q .

Ocena dokładności pomiarów.

Na dokładność pomiarów wpływają czynniki obiektywne, zależne od dokładności przyrządów oraz czynniki subiektywne, zależne od eksperymentatora.

Omówimy kolejno każde ze źródeł niepewności.

1. Pomiar częstości. Stosowany w eksperymentach częstościomierz jest przyrządem z wewnętrznym zegarem kwarcowym i w zakresie częstości występujących w doświadczeniu jego niestabilność może być pominięta. Decydujący wpływ ma błąd przetwarzania na wartość cyfrową i wynosi on ± 1 wartości wyświetlanej przez najmniej znaczącą dekadę wyświetlacza [lit].
2. Pomiar napięć.
Niepewność miliwoltomierza VM-1526 w zakresach pomiarowych od 1mV do 300mV wynosi $\pm 1.5\%$ zakresu pomiarowego plus $\pm 2\%$ wartości mierzonej.
W zakresach pomiarowych od 1V do 300V niepewność wynosi $\pm 1.5\%$ zakresu pomiarowego plus $\pm 3\%$ wartości mierzonej.
3. Oscyloskop.
Istotna jest niepewność popełniana przez eksperymentatora podczas wpasowania przebiegu plamki pierwszego kanału oscyloskopu (CH1) na ekranie oscyloskopu do pełnego zakresu skali oraz błąd odczytu przesunięcia sygnału z 2-go kanału oscyloskopu (CH2). Typowe błędy wynoszą ± 2 działki dla każdego kanału.

Wyliczone zawady, przewodności pozorne i przesunięcia fazowe powinny być uzupełnione wyliszonymi niepewnościami pomiarowymi. Obliczenia niepewności należy przeprowadzić na krańcach zakresu częstości krzywych i w kilku punktach pośrednich, w szczególności w pobliżu częstości rezonansowej.

Także wykresy zawady, przewodności pozornej i przesunięcia fazowego powinny posiadać zaznaczone przedziały niepewności w tych wybranych punktach pomiarowych.

Literatura

1. E. M. Purcel, *Elektryczność i Magnetyzm*, PWN, Warszawa 1971.
2. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *Feynmana Wykłady z fizyki*, t. II, cz. 2, PWN, W-wa 2007.
3. *Instrukcja obsługi, Power Generator Type PO-26*, Zopan, Warszawa.
4. *Instrukcja obsługi, Częstościomierz automatyczny*, Kabid-|Zopan, Warszawa.
5. *Instrukcja obsługi, Woltomierz-wzmacniacz Typ VM-1526*, ZBUT Warszawa.
6. *Instrukcja obsługi, Oscyloskop DF4321C*, NDN.

Appendix: Materiały pomocnicze

(skrótowy opis zjawisk i pojęć fizycznych związanych z celem ćwiczenia)

3.1. Opór, indukcyjność i pojemność.

Indukcyjność L i pojemność C , podobnie jak i opór R , charakteryzują obwody elektryczne. Ich wartości zależą od własności materiałowych, rozmiarów i geometrii. Są definiowane poprzez podstawowe wielkości fizyczne w następujący sposób:

$$V_C = \frac{Q}{C} \quad (1)$$

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2)$$

$$V_R = \frac{I}{R} \quad (3)$$

Jednostką pojemności jest farad [F], jednostką indukcyjności jest henr [H], a jednostką oporu jest om [Ω].

3.2. Przesunięcia fazowe elementów R , L i C .

Zachowanie kondensatorów, cewek i oporników w obwodach prądu zmiennego wymaga uwzględnienia zależności czasowych pomiędzy prądem płynącym przez element, a napięciem na nim występującym. W obwodzie z kondensatorem C napięcie opóźnia się względem prądu i mówimy że przesunięcie fazowe $\varphi = -\pi/2$ jest ujemne. Odwrotnie, w obwodzie z cewką o indukcyjności L napięcie na niej wyprzedza prąd i przesunięcie fazowe $\varphi = \pi/2$ jest dodatnie. Znaki przesunięcia fazowego będą odwrotne, jeśli będziemy rozpatrywali zmiany prądu względem zmian napięcia. W oporniku prąd i napięcie zmieniają się w zgodnej fazie $\varphi = 0$.

Zarówno kondensator jak i cewka przewodzą prąd ale opór elektryczny (a zatem i ich przewodność) zależą od częstości prądu.

3.3. Zawada Z i przewodność pozorna Y .

Wielkością, która opisują opór zależny od częstości oraz przesunięcie fazowe każdego z elementów, jest zawada Z . Jednostką zawady jest om [Ω]. Odwrotnością zawady jest z kolei przewodność pozorna $Y = 1/Z$. Wygodnym sposobem zapisu napięcia zmiennego (a także prądu zmiennego) z jednoczesnym uwzględnieniem przesunięcia fazowego pomiędzy nimi, jest jej postać w formie liczby zespolonej. W tym zapisie przesunięciu $\pi/2$ odpowiada położenie wektora o długości V na osi $+i$, przesunięciu $-\pi/2$ odpowiada położenie wektora o długości Z na osi $-i$ a każde inne V , z dowolnym przesunięciem fazowym, można wyrazić w takich współrzędnych jako wektor o długości równej modułowi liczby zespolonej. Pojawienie się w obwodzie oporu R wprowadza część rzeczywistą takiej liczby zespolonej. Tabela 1 przedstawia zawady i przewodności pozorne elementów R , L i C .

Tabela 1. Zawady i przewodności pozorne elementów obwodu.

Element	Zawada, Z	Przewodność pozorna, $Y = 1/Z$
R	R	$\frac{1}{R}$
L	$i\omega L$	$\frac{-i}{\omega L}$
C	$\frac{-i}{\omega C}$	$i\omega C$

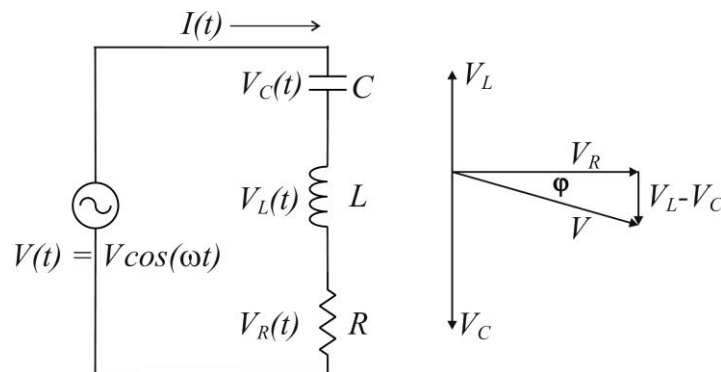
Zawady (i przewodności pozorne) cewek i kondensatorów są wielkościami urojonymi a ich dowolne kombinacje też będą wielkościami urojonymi, co oznacza że różnica faz pomiędzy napięciem a prądem może być równa $+\pi/2$, $-\pi/2$ lub 0 . Włączenie do obwodu oporu zmienia przesunięcie fazowe. Ponieważ cewki, podobnie jak źródła prądu i kable, zawsze mają skończony, różny od zerowego opór elektryczny a izolatory kondensatorów nie są idealne, w każdym obwodzie elektrycznym wypadkowe przesunięcie fazowe φ pomiędzy prądem zmiennym a napięciem, zależy od częstotliwości.

3.4. Częstość rezonansowa.

W obwodach zawierających R , L i C , w szczególnych warunkach, przy określonej częstotliwości, zwanej częstotliwością rezonansową, przesunięcie fazowe jest równe 0 . Omówimy teraz warunki rezonansu i wielkości je charakteryzujące w obwodach RLC szeregowych i równoległych.

3.5. Obwód szeregowy RLC .

Na rysunku 1 pokazano schematycznie obwód szeregowy LC z oporem R symbolizującym sumaryczny opór cewki L i opornika zewnętrznego. Przyjmujemy, że opór wewnętrzny źródła prądu o napięciu zmiennym w czasie z częstotliwością kątową ω i amplitudą V_0 jest równy 0 .



Rys.1. Schemat obwodu szeregowego RLC i sposób graficznego przedstawienia zależności fazowych napięć w chwili t z użyciem liczb zespolonych.

W obwodzie szeregowym przez każdy element płynie taki sam prąd zmienny w czasie I z amplitudą I_0 a suma napięć na poszczególnych elementach obwodu, w każdej chwili, wynosi V .

Korzystając z Tabeli I możemy napisać:

$$V = V_R + V_L + V_C = Z_R I + Z_L I + Z_C I = (Z_R + Z_L + Z_C) I \quad (4)$$

Suma zawad Z wynosi:

$$Z = R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (5)$$

a prąd płynący w obwodzie w chwili gdy napięcie zasilania wynosi V jest:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\left[R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right]} \quad (6)$$

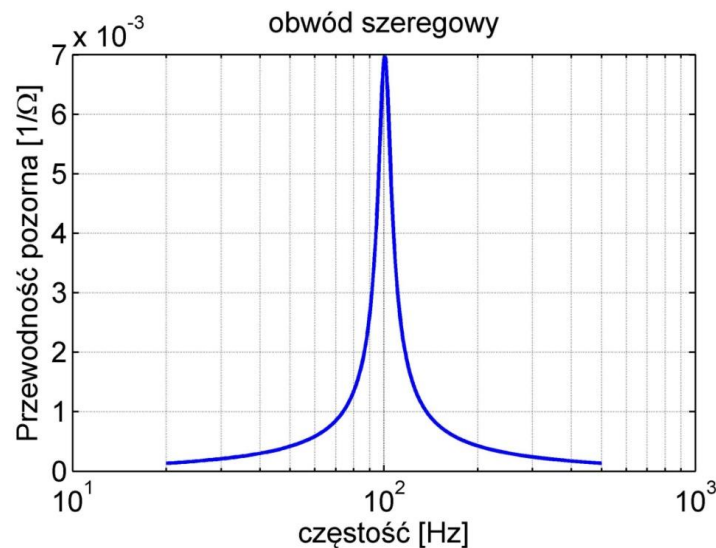
Amplituda zmian prądu płynącego w obwodzie jest równa modułowi liczby zespolonej I :

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \quad (7)$$

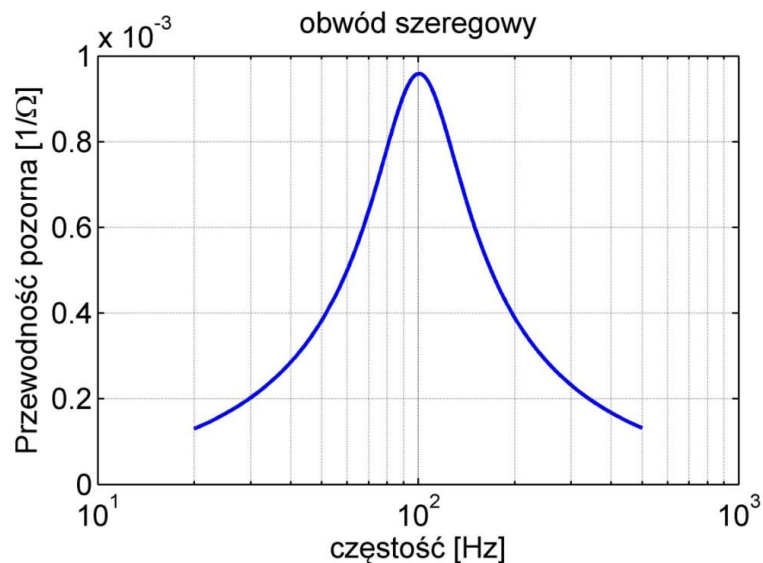
Maksymalny prąd popłynie gdy wyrażenie w nawiasie przyjmie wartość 0 i można to osiągnąć poprzez dopasowanie częstości ω , pojemności C albo indukcyjności L . Taka szczególna częstość, ω_0 , nosi nazwę rezonansowej. Kąt przesunięcia fazowego prądu (a więc i napięcia na oporze R) danego równaniem (6) względem napięcia zasilania V , liczony jako arcus tangens stosunku części urojonej do rzeczywistej wyrażenia z równania (6) jest:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega CR}\right) \quad (8)$$

Wzór pokazuje, że dla częstości mniejszych od rezonansowej kąt przesunięcia fazowego prądu względem napięcia zasilania jest ujemny a dla większych jest dodatni, co oznacza dominację przepływu prądu przez cewkę, albo przez kondensator.



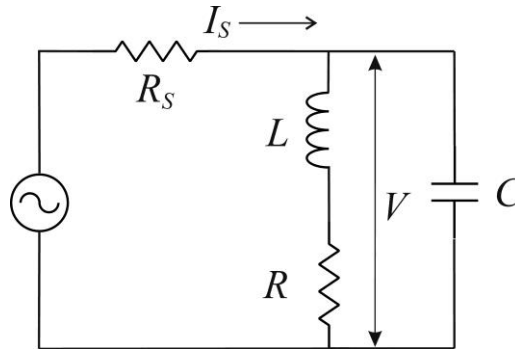
Rys.2. Obliczona ze wzoru (7) krzywa teoretyczna modułu przewodności pozornej I_0/V_0 szeregowego obwodu rezonansowego z $R = 143 \Omega$, $L = 2.5 H$, $C = 1\mu F$.



Rys. 3. Obliczona ze wzoru (7) krzywa teoretyczna modułu przewodności pozornej I_0/V_0 szeregowego obwodu rezonansowego z $R = 1043 \Omega$, $L = 2.5 H$, $C = 1\mu F$.

3.6. Obwód równoległy RLC

Chociaż w idealnym obwodzie równoległym RLC wszystkie elementy powinny być połączone równolegle, to z powodu nieuniknionego, skończonego oporu cewki, warto rozważyć obwód, w którym opór R jest połączony szeregowo z cewką L , tak jak ilustruje schematycznie rysunek 4.



Rys. 4. Obwód równoległy RLC

Tym razem zasilacz będzie miał duży, w porównaniu z zawadą obwodu, opór wewnętrzny oznaczony na Rys.4 jako R_S i powinien być źródłem prądu o stałej, niezależnej od częstości amplitudzie. Ponieważ jednak ostatni warunek jest trudny do spełnienia, zmiany amplitudy prądu zasilającego będą musiały być uwzględnione podczas analizy wyników pomiarów.

Prąd zasilania obwodu RLC z Rys.4 wynosi:

$$I = I_{RL} + I_C = Y_{RL}V + Y_C V = (Y_{RL} + Y_C)V = YV \quad (9)$$

I_{RL} i Y_{RL} oznaczają prąd i przewodność pozorną gałęzi zawierającej opornik i cewkę. Y_{RL} można zapisać jako odwrotność sumy zawod:

$$Y_{RL} = \frac{1}{Z_R + Z_L} \quad (10)$$

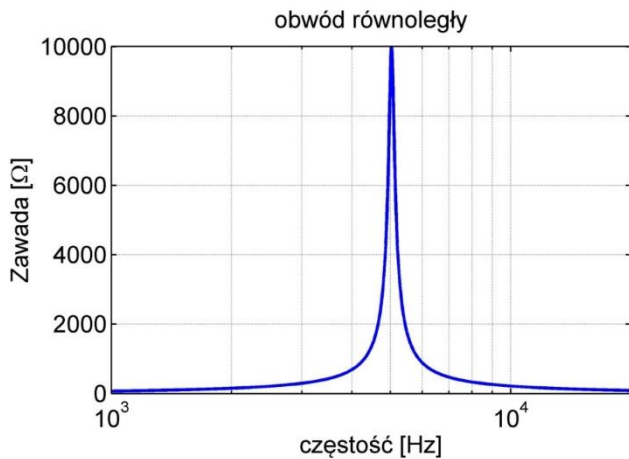
Podstawiając odpowiednie zależności z Tabeli I otrzymujemy:

$$Y = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} + i \left[\omega C - \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} \right] \quad (11)$$

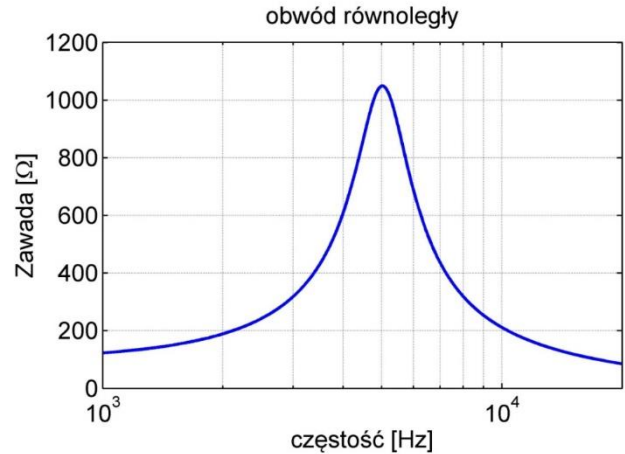
Napięcie pojawiające się na kondensatorze w chwili gdy płynie prąd zasilania I_0 wynosi zatem:

$$V = \frac{I_0}{Y} \quad (12)$$

Podobnie jak w przypadku obwodu szeregowego, amplituda zmian napięcia V jest równa modułowi liczby zespolonej V . Równania (11) i (12) mogą posłużyć do obliczenia zmian napięcia i kąta przesunięcia fazowego w funkcji częstości zasilającego prądu i najlepiej użyć do tego programu Matlab.



Rys. 5. Obliczona krzywa teoretyczna modułu zawady równoległego obwodu rezonansowego z $R = 10 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$, $C = 0.1 \mu\text{F}$.



Rys. 6. Obliczona krzywa teoretyczna modułu zawady równoległego obwodu rezonansowego z $R = 100 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$, $C = 0.1 \mu\text{F}$.

3.7. Współczynnik dobroci obwodu

Obecność oporu R w obwodzie powoduje straty energii zmagazynowanej w polu magnetycznym cewki i polu elektrycznym kondensatora. W słabo tłumionych obwodach miarą strat energii jest bezwymiarowy współczynnik dobroci Q definiowany następująco:

$$Q = 2\pi \frac{\text{energia zmagazynowana w obwodzie}}{\text{średnia energia tracona w czasie jednego cyklu}} \quad (13)$$

Prąd, tak jak i napięcie, w odłączonym od źródła energii obwodzie RLC będą tłumione wykładniczo z czasem, proporcjonalnie do czynnika $e^{-\alpha t}$. Energia w obwodzie będzie zatem zmniejszać się proporcjonalnie do $e^{-2\alpha t}$ i po czasie $t = 1/(2\alpha)$ zmaleje e krotnie.

Można wykazać, że w obwodzie szeregowym współczynnik dobroci wyraża się poprzez:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (14)$$

Inną miarą własności rezonansowych obwodu jest pasmo przenoszenia. Jest określane jako zakres częstotliwości wokół częstotliwości rezonansowej f_0 , wyznaczony przez zmiany mocy w obwodzie o połowę, czyli między częstotliwościami f_1 a f_2 dla których amplituda prądu zmniejsza się $1/\sqrt{2}$ razy. Pomiędzy pasmem przenoszenia Δf a współczynnikiem dobroci zachodzi zależność:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} \quad (15)$$