

Ćwiczenie 4

Prawa autorskie zastrzeżone:
Zakład Teorii Obwodów PWr

OBWODY REZONANSOWE

Celem ćwiczenia jest:

- zapoznanie się ze zjawiskiem rezonansu w równoległym obwodzie rezonansowym,
- zapoznanie się ze zjawiskami rezonansowymi zachodzącymi w dwóch obwodach rezonansowych sprzężonych magnetycznie.

W ćwiczeniu należy:

- wyznaczyć krzywe rezonansu oraz ich parametry dla równoległego obwodu rezonansowego,
- zbadać wpływ tłumienia na przebieg krzywej rezonansu,
- zaobserwować wpływ sprzężenia na krzywe rezonansu obwodów sprzężonych magnetycznie oraz zmierzyć parametry charakteryzujące te krzywe,
- zbadać wpływ rozstrojenia i tłumienia na właściwości obwodów rezonansowych.

A. Wprowadzenie

Zjawisko rezonansu występuje w obwodach elektrycznych zawierających elementy reaktancyjne LC, zdolne do gromadzenia energii w polu magnetycznym i elektrycznym, gdy energia między tymi elementami jest przekazywana z małymi stratami. Ze względu na łatwość konstruowania oraz dobrze opracowane metody analizy i syntezy elektryczne obwody rezonansowe wykorzystuje się do modelowania zjawisk rezonansowych zachodzących w układach o innej naturze zjawisk fizycznych. Poznanie własności tych obwodów, pozwala więc zrozumieć istotę zjawisk rezonansowych zachodzących w innych układach dynamicznych, np., mechanicznych, akustycznych itp.

W elektronice obwody rezonansowe stosuje się między innymi do selektywnego odbioru sygnałów i w układach generacyjnych.

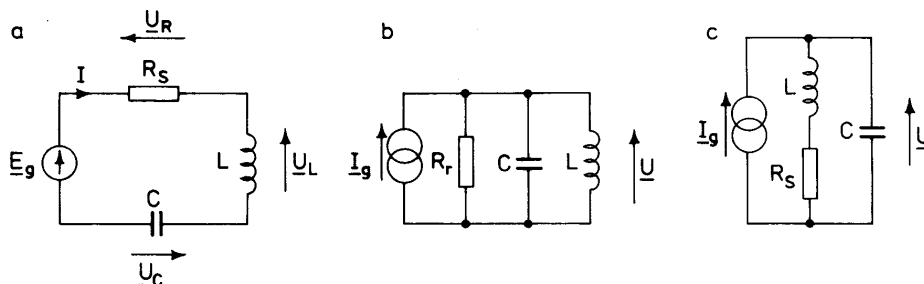
1. Pojedyncze obwody rezonansowe

Połączenie w jeden układ elementów LC z rezystorem reprezentującym straty energii umożliwia budowę najprostszych obwodów rezonansowych - szeregowego lub równoległego. Trzy takie układy pokazano na rys.1. Własności tych obwodów opisuje się za pomocą dobroci - wielkości charakteryzującej ilościowo układ rezonansowy. Dobroć Q jest wielkością bezwymiarową charakteryzującą układy, w których występują drgania; dobroć układu jest proporcjonalna do stosunku energii W_m magazynowanej w układzie przy rezonansie, do energii W_t traconej w ciągu jednego okresu drgań; określa ją ogólny wzór: $Q = 2\pi W_m / W_t$. Można wykazać, że dla obwodów z rys.1a i 1c dobroć Q można wyznaczyć z zależności

$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R_s \sqrt{C}}, \quad (1a)$$

a dla obwodu z rys. 1b

$$Q = \frac{R_r}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (1b)$$



Rys. 1

Drugim parametrem charakteryzującym własności rezonansowe wszystkich trzech obwodów jest częstotliwość nazywana rezonansową, opisana wzorem Thomsona

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Przy tej częstotliwości impedancje obwodów z rys. 1a i b przyjmują ekstremalne wartości, równe odpowiednio R_s (minimum impedancji układu z rys. 1a) i R_r (maksimum impedancji układu z rys. 1b), natomiast impedancja układu z rys. 1c osiąga maksymalną wartość, równą w przybliżeniu

$$Z_0 = \frac{L}{R_s C} = Q^2 R_s \quad (3)$$

Można pokazać [1], że własności obydwu obwodów równoległych z rys. 1 są bardzo zbliżone, jeżeli mają jednakowe dobroci i częstotliwości rezonansowe oraz gdy $R_r = Z_0$. Rezonansowy charakter zmian prądu \underline{I} w układzie z rys. 1a i napięcia \underline{U} w układzie z rys. 1b i 1c opisuje znormalizowana funkcja

$$\underline{n} = \frac{1}{1 + jQ\left(\eta - \frac{1}{\eta}\right)} = \frac{1}{1 + jQa} \quad (4)$$

gdzie: $\underline{n} = \frac{\underline{I}}{\underline{I}_0}$ lub $\underline{n} = \frac{\underline{U}}{\underline{U}_0}$,

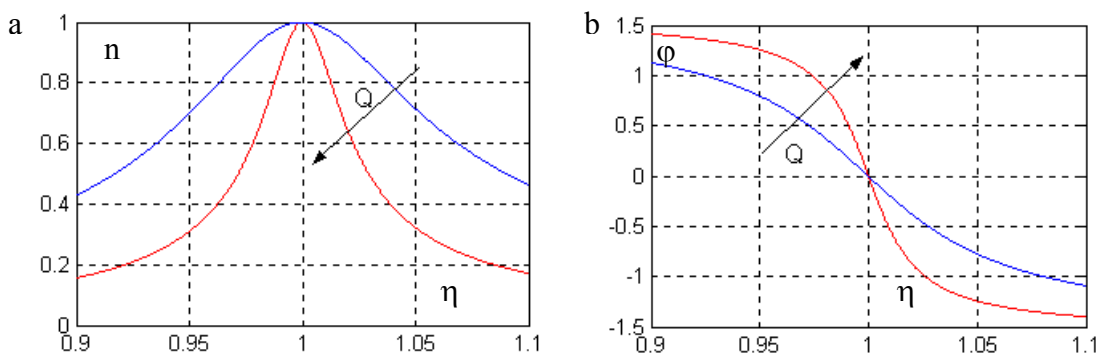
$I_0 = \frac{E_g}{R_s}$ - maksymalna wartość skuteczna prądu \underline{I} w układzie z rys. 1a,

$U_0 = R_r I_g$ lub $U_0 = Z_0 I_g$ - maksymalna wartość skuteczna napięcia \underline{U} w układach z rys. 1b i 1c,

$\eta = \frac{f}{f_0}$,

$a = \eta - \frac{1}{\eta} \cong \frac{2(f - f_0)}{f_0}$ - odstrojenie względne.

Charakterystyki amplitudowa i fazowa funkcji $\underline{n}(\eta)$ zostały pokazane na rys. 2.



Rys. 2

Z analizy równania (4) wynika, że 3-decybelowa szerokość pasma przenoszenia równoważnych obwodów jest równa

$$2\Delta f_0 = f_g - f_d = \frac{f_0}{Q}, \quad (5)$$

gdzie f_g i f_d odpowiednio górna i dolna częstotliwość graniczna. Z zależności (5) można więc pomiarowo wyznaczyć dobroć obwodu $Q = \frac{f_0}{f_g - f_d}$.

Jak wynika z rys.2 i zależności (5), obwody rezonansowe o większej dobroci Q charakteryzuje węższe pasmo przenoszenia sygnałów oraz bardziej stromo opadające zbocze krzywej rezonansu, a charakterystyka amplitudowa i fazowa takich obwodów zmienia się bardzo gwałtownie w otoczeniu częstotliwości f_0 .

Rezonans w obwodzie szeregowym (rys. 1a) nazywa się rezonansem napięć, gdyż przy częstotliwości f_0 napięcia na elementach reaktancyjnych są Q -krotnie większe od napięcia źródła E_g . Analogicznie, rezonans w obwodzie równoległym (rys.1b i c) nosi nazwę rezonansu prądów, ponieważ przy częstotliwości f_0 prądy w gałęziach z elementami reaktancyjnymi są Q -krotnie większe od prądu źródłowego I_g . Zjawiska te stwarzają niebezpieczeństwo uszkodzenia izolacji lub zniszczenia cieplnego tych elementów.

Charakterystyka rezonansowa pokazana na rys.2a dotyczy obwodów pobudzanych przez źródła idealne. W przypadku, gdy rezystancja źródła jest równa R_g , przebieg tej charakterystyki jest taki, jak dla układów o dobroci

$$Q_w = \frac{Q}{1 + \frac{R_g}{R_s}} \quad (6a)$$

lub

$$Q_w = \frac{Q}{1 + \frac{R_r}{R_g}}. \quad (6b)$$

Rzeczywiste źródła pogarszają własności selektywne i zmieniają kształt charakterystyk częstotliwościowych obwodów rezonansowych.

Traktując spadek napięcia \underline{U}_c na kondensatorze jako wartość skuteczną zespoloną (WSZ) reakcji, a \underline{E}_g jako WSZ pobudzenia układu z rys.1a, otrzymuje się funkcję transmitancji napięciowej

$$\underline{T}_u = \frac{\underline{U}_c}{\underline{E}_g} = Q \frac{n}{\eta}. \quad (7)$$

Ze względu na czynnik $\eta = \frac{f}{f_0}$ występujący w mianowniku równania (7), moduł transmitancji T_u osiąga maksimum przy częstotliwości $f_c < f_0$, przy czym

$$f_c = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \approx f_0 \left(1 - \frac{1}{4Q^2} \right). \quad (8)$$

Dla obwodów równoległych duże znaczenie ma funkcja transmitancji

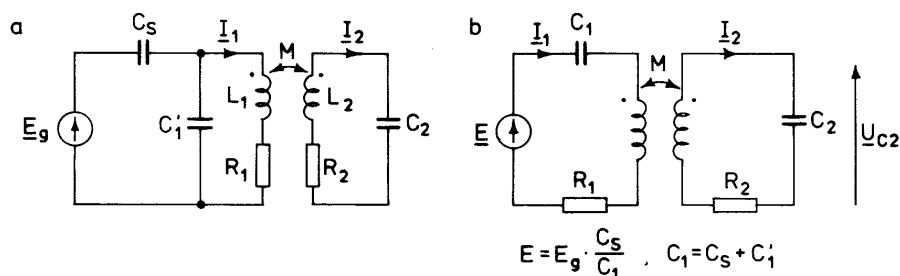
$$\underline{T}_{ui} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}_g} = Z_r \underline{n}, \quad (9)$$

gdzie $Z_r = R_r$ lub $Z_r = Z_0$.

W praktyce, jeżeli obwody posiadają dużą dobroć ($Q > 10$), przyjmuje się, że krzywe rezonansu napięć na elementach reaktancyjnych osiągają wartości ekstremalne przy $f = f_0$. Ze wzoru (8) wynika, że przy $Q = 10$ błąd w ocenie częstotliwości f_c nie przekracza 0,25%.

2. Obwody rezonansowe sprzężone magnetycznie

W celu poprawienia własności selektywnych pojedynczych obwodów rezonansowych sprzęga się je za pośrednictwem pola elektrycznego, magnetycznego, łączy galwanicznych bądź też w sposób kombinowany. Na rys.3a pokazano dwa pojedyncze obwody sprzężone magnetycznie, których własności są badane w ćwiczeniu. Na rys.3b, pokazano uproszczony (równoważny) schemat tych obwodów.



Rys. 3

Własności dwóch pojedynczych obwodów sprzężonych magnetycznie charakteryzują dobroć tych obwodów Q_1 i Q_2 , częstotliwości własne f_1 i f_2 oraz współczynnik sprzężenia

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (9)$$

Prądy \underline{I}_1 oraz \underline{I}_2 płynące w obwodzie pierwotnym i wtórnym opisane są następującymi równaniami [1]:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{R_1} \frac{1 + ja_2}{1 - a_1 a_2 + \frac{\omega^2 k L_1 L_2}{R_1 R_2} + j(a_1 + a_2)}, \quad (10)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}}{\sqrt{R_1 R_2}} \frac{j \frac{\omega k \sqrt{L_1 L_2}}{\sqrt{R_1 R_2}}}{1 - a_1 a_2 + \frac{\omega^2 k L_1 L_2}{R_1 R_2} + j(a_1 + a_2)}, \quad (11)$$

gdzie: $\omega = 2\pi f$,

$$a_1 = Q_1 \left(\frac{f}{f_1} - \frac{f_1}{f} \right) - \text{odstrojenie obwodu pierwotnego,}$$

$$a_2 = Q_2 \left(\frac{f}{f_2} - \frac{f_2}{f} \right) - \text{odstrojenie obwodu wtórnego.}$$

Z zależności (10) i (11) wynika, że charakterystyki częstotliwościowe prądów \underline{I}_1 oraz \underline{I}_2 są w znacznym stopniu uzależnione od parametrów Q_1 , Q_2 , f_1 , f_2 i k . Przebieg znormalizowanych charakterystyk obwodów o jednakowej dobroci ($Q_1 = Q_2 = Q$) dostrojonych do jednej częstotliwości rezonansowej ($f_1 = f_2 = f_0$) dla wybranych wartości iloczynu Qk pokazano na rys.4. Przebieg $n_1(a)$ przy $0 \leq k < k_{kr} = \frac{0.4859}{Q}$ jest krzywą jednowierzchołkową, a przy $k > k_{kr}$, - krzywą dwuwierzchołkową. Prąd I_2 w obwodzie wtórnym osiąga wartość maksymalną przy $k_{opt} = \frac{1}{\sqrt{Q_1 Q_2}} = \frac{1}{Q}$. W miarę dalszego wzrostu sprzężenia, po przekroczeniu wartości krytycznej

$$k_{kr} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{Q_1^2} + \frac{1}{Q_2^2}}, \quad (11)$$

równej dla $Q_1 = Q_2 = Q$ sprzężeniu optymalnemu k_{opt} , krzywa $n_2(a)$ staje się dwuwierzchołkowa. Jednocześnie częstotliwości, dla których występuje maksimum prądu I_2 , stają się coraz bardziej różne od f_0 .

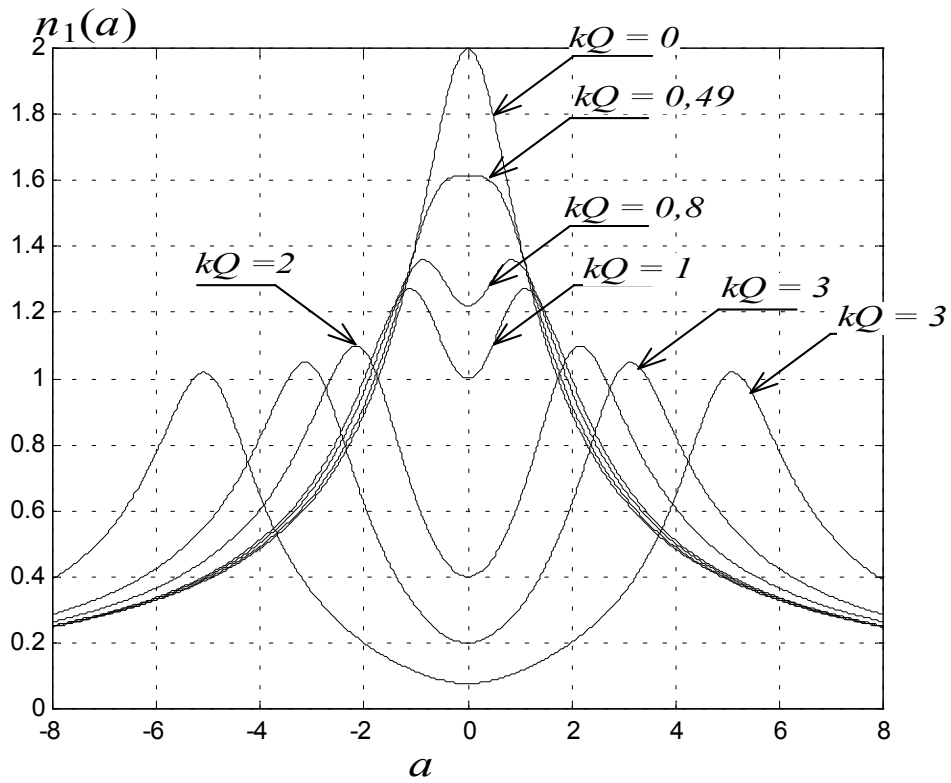
Przy wyznaczaniu szerokości pasma obwodów sprzężonych o identycznych obwodach korzysta się z zależności

$$n_2(a) = \frac{I_2}{I_{2m}} = \frac{2kQ}{\sqrt{(1 + k^2 Q^2) + 2(1 - k^2 Q^2)a^2 + a^4}}, \quad (12)$$

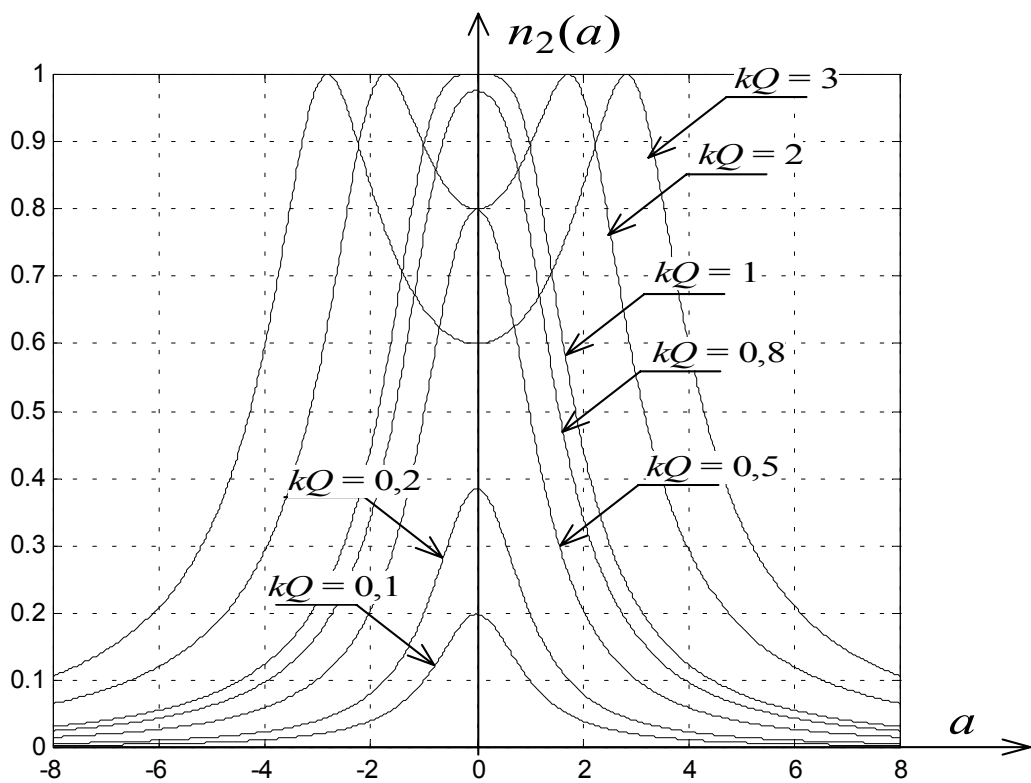
gdzie

$$I_{2m} = \frac{E}{2\sqrt{R_1 R_2}}. \quad (13)$$

Charakterystyki $n_2(a)$ dla różnych wartości kQ przedstawiono na rys. 4b.



Rys. 4a



Rys. 4b

Szczegółowa analiza szerokości pasma $2\Delta f_0$ krzywej n_2 prowadzi do następujących zależności [1]:

$$2\Delta f_0 = \frac{f_0}{Q_0} \sqrt{k^2 Q^2 - 1 + \sqrt{2} \sqrt{1 + k^4 Q^4}}, \quad 0 \leq kQ < 1, \quad (14a)$$

$$2\Delta f_0 = \frac{f_0}{Q_0} \sqrt{k^2 Q^2 - 1 + 2kQ}, \quad 1 \leq kQ < 1 + \sqrt{2}. \quad (14b)$$

Stosowanie sprzężeń, dla których $k > \frac{1+\sqrt{2}}{Q}$, jest niecelowe, gdyż dla $k = k_{gr} = \frac{1+\sqrt{2}}{Q}$ powstają dwa oddzielne pasma przenoszenia.

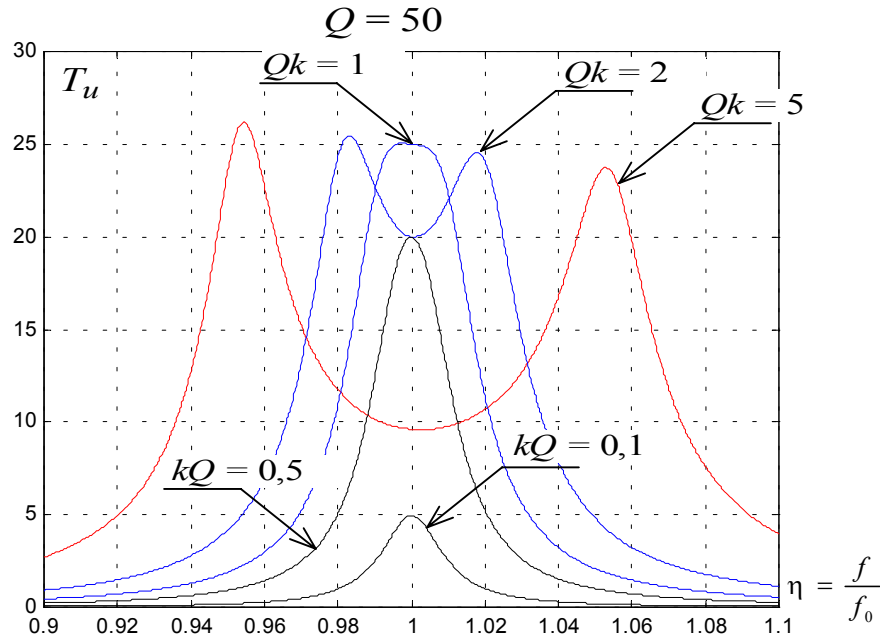
Transmitancja napięciowa obwodów sprzężonych, zdefiniowana zależnością

$$\underline{T}_u = \frac{\underline{U}_{c2}}{\underline{E}},$$

gdzie \underline{U}_{c2} - spadek napięcia na kondensatorze obwodu wtórnego wyrażony wzorem

$$\underline{T}_u(\eta) = \frac{kQ^2}{1 - Q^2 \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right)^2 + k^2 Q^2 \eta^2 + j2Q \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right)} = -j \frac{1}{2} Q \eta^{-1} \underline{n}_2. \quad (15)$$

Przebieg charakterystyki amplitudowej $T_u(\eta)$ pokazano na rys.5. Ekstremum globalne dla krzywych dwuwierchołkowych występuje przy częstotliwościach mniejszych od odpowiednich częstotliwości dla krzywych z rys.4b, co tłumaczy się wystąpieniem czynnika $\eta^{-1} = f_0/f$ we wzorze (15). Dla obwodów o dużej dobroci kształt krzywej opisanej zależnością (15) jest bardzo zbliżony do krzywej n_2 (13). Można, więc przyjąć, że wzory (14a) i (14b), opisujące szerokości pasma krzywej n_2 , pozostają w przybliżeniu słuszne dla transmitancji \underline{T}_u .



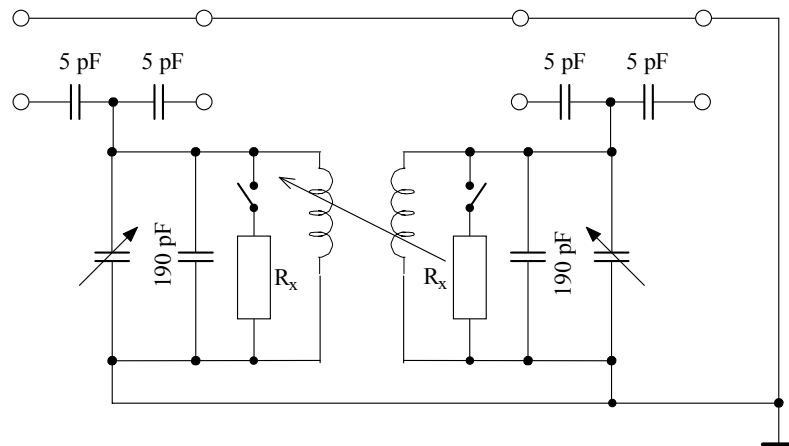
Rys. 5

3. Opis panelu laboratoryjnego

W skład badanego zestawu wchodzi panel zawierający dwa równoległe obwody rezonansowe sprzężone magnetycznie.

Regulacja sprzężenia w panelu odbywa się poprzez zmianę odległości między cewkami, a zmiana częstotliwości rezonansowych przez zmianę pojemności kondensatorów. Obydwa obwody można sprząć z generatorem i sondą pomiarową za pośrednictwem kondensatorów o pojemności 5 pF. Dzięki temu zmniejsza się znacznie wpływ tłumiącego działania generatora o małej rezystancji wyjściowej (75Ω) oraz sondy pomiarowej.

Schemat elektryczny panelu z dwoma obwodami rezonansowymi sprzężonymi magnetycznie pokazano na rys.6.



Rys. 6

B. Część laboratoryjna

Wykaz przyrządów:

- wobulator,
- oscyloskop z RS232,
- generator RC,
- woltomierz,
- komputer wraz z oprogramowaniem do komunikacji z oscyloskopem,
- drukarka.

1. Badanie własności pojedynczego obwodu równoległego

- 1.1 Wyznaczyć zakres przestrajania obwodu pierwotnego i wtórnego (zmierzyć $f_{0\min}$ i $f_{0\max}$).
- 1.2 W panelu zawierającym dwa równoległe obwody rezonansowe rozsunąć cewki na maksymalną odległość. Dołączyć wyjście wobulatora do wybranego obwodu rezonansowego przez kondensator 5 pF. Wybrać zakres częstotliwości 1-3.2 MHz. Równoległe dołączyć (również przez kondensator 5 pF) sondę pomiarową. Dobrać tak poziom sygnału i częstotliwość środkową f_0 ($f_{0\min} < f_0 < f_{0\max}$), aby na środku ekranu ukazała się krzywa rezonansowa o możliwie dużej wysokości (zalecana wartość, to 7 działek). Zmierzyć f_0 , f_g , f_d (f_g oraz f_d - współrzędne na wysokości 5 działek ($\approx 7/\sqrt{2}$) punktów leżących na krzywej). Wydrukować krzywą rezonansową obwodu pierwotnego bez obciążeń na drukarce. Rzędna jest proporcjonalna do napięcia na kondensatorze obwodu równoległego. Z przebiegu krzywej rezonansu określić szerokość pasma $2\Delta f_0$ i dobroć Q obwodu. Częstotliwość rezonansową obwodu pierwotnego ustawić (za pomocą C), tak, aby nie mierzyć dwa razy parametrów tego obwodu w przypadku, gdy będzie wykonywany pkt. 2.1.
- 1.3 Wcisnąć przycisk włączający do badanego układu rezystor tłumiący R_x . Zmierzyć f'_0 , f'_g , f'_d . Wydrukować krzywą rezonansową jak w punkcie 1.2. Wyznaczyć szerokość pasma $2\Delta f'_0$ oraz dobroć Q' .
- 1.4 Obliczyć indukcyjność cewki i rezystancję R_x . Wykorzystać wyznaczoną w punkcie 1 częstotliwość $f_{0\max}$ przyjmując, że $C_{\min} = 190 \text{ pF}$.

2. Badanie własności obwodów sprzężonych magnetycznie

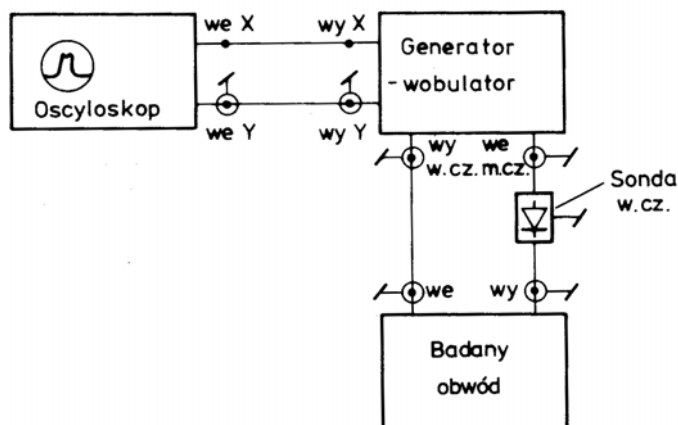
- 2.1. Do jednego z obwodów rezonansowych dołączyć (poprzez kondensator 5 pF) wyjście wobulatora, a do drugiego obwodu (również za pośrednictwem kondensatora 5 pF) sondę pomiarową. Cewki rozsunąć na maksymalną odległość. Dobrać tak pojemność kondensatora obwodu wtórnego, aby na ekranie oscyloskopu ukazała się krzywa rezonansowa o maksymalnej wysokości. Wydrukować krzywe rezonansowe obydwu obwodów pojedynczych (jak w punkcie 1.1) i wyznaczyć parametry f_{01} , Q_1 , f_{02} , Q_2 . Na ich podstawie obliczyć przewidywaną wartość sprzężenia krytycznego i granicznego oraz szerokości pasm dla tych sprzężeń. Przyjąć $Q = \sqrt{Q_1 Q_2}$.
- 2.2. Dobrać odległość między cewkami tak, aby na ekranie oscyloskopu zaobserwować krzywe charakterystyczne dla sprzężenia krytycznego k_{kr} i granicznego k_{gr} . Wydrukować wykresy oraz zmierzyć szerokości pasm obwodów dla tych sprzężeń.

- 2.3. Wykreślić krzywe przedstawiające zależność wartości ekstremalnych krzywej rezonansu (maksimum i minimum lokalnego), jako funkcję odległości (w działkach) między cewkami.
- 2.4. Zaobserwować krzywe rezonansowe obwodu pierwotnego i wtórnego dołączając kolejno do tych obwodów rezystor tłumiący R_X . Sprężenie ustawić bez rezystorów tłumiących jako graniczne.
- 2.5. Zbadać wpływ rozstrojenia poszczególnych obwodów na kształt krzywej rezonansu. Sprężenie ustawić bez rezystorów tłumiących jako graniczne.

C. Pomiary krzywych rezonansu

1. Zasada pomiaru

W skład zestawu pomiarowego wchodzi generator z wobulacją częstotliwości oraz oscyloskop i sonda w.cz. Schemat zestawu pokazano na.7.



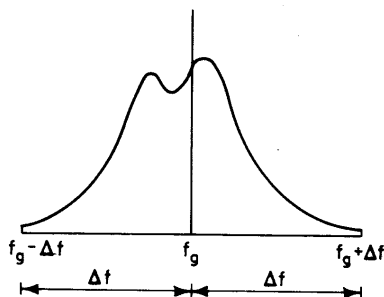
Rys. 7

Zasada działania zestawu jest następująca: Z generatora o wobulowanej częstotliwości nośnej napięcie o stałej amplitudzie i zmiennej częstotliwości doprowadzone jest na wejście badanego obwodu. Napięcie z wyjścia tego obwodu jest prostowane przez sondę w.cz., która wytwarza napięcie stałe proporcjonalne do amplitudy napięcia na wyjściu obwodu. Następnie napięcie z sondy jest wzmacniane wstępnie we wzmacniaczu Y generatora - wobulatora i doprowadzone do wzmacniacza Y oscyloskopu. Jednocześnie na wejście X oscyloskopu doprowadzone jest z wobulatora napięcie piłokształtne, które moduluje częstotliwość nośną generatora. W rezultacie odchylenie plamki w kierunku osi X jest proporcjonalne do różnicy częstotliwości chwilowej i częstotliwości ustawionej na skali przyrządu (generatora - wobulatora), a odchylenie w kierunku osi Y do chwilowej wartości krzywej rezonansowej. Charakterystyczne częstotliwości krzywej rezonansowej mierzymy za pomocą dołączonego częstotliczomierza przełączając generator – wobulator w tryb pracy AM. Mierzona częstotliwość odpowiada punktowi na krzywej rezonansowej znajdującej się w środku ekranu oscyloskopu (wzmocnienie (ustawić DC) i przesunięcie w kierunku X powinno być tak ustawione, aby pozioma linia powrotu na ekranie oscyloskopu dokładnie miała długość maksymalną liczbę działek w kierunku X).

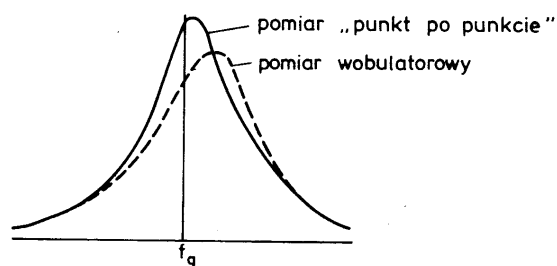
2. Skalowanie osi X oscyloskopu

Po ustawieniu krzywej rezonansu w części środkowej ekranu można przystąpić do opisu osi częstotliwości. W prawidłowo zestawionym układzie środkowi odcinka poziomego na osi częstotliwości odpowiada częstotliwość f_g ustawiona na skali generatora-wobulatora. Skrajnym punktem tego odcinka odpowiadają częstotliwości różniące się od częstotliwości f_g o wartość dewiacji Δf (rys.8).

Wartość dewiacji Δf określa maksymalne odchylenie częstotliwości generatora od częstotliwości środkowej f_g . Ustawia się ją za pomocą pokrętła dewiacji, zgodnie z opisem na skali pokrętła. Wartość ta jest podawana w procentach częstotliwości środkowej. Ponieważ oś częstotliwości w otoczeniu f_g jest liniowa, można na tej podstawie określić zmianę częstotliwości generatora przypadającą na 1 cm długości osi poziomej. Inny sposób skalowania osi częstotliwości polega na zmianie częstotliwości f_g generatora (co powoduje poziome przesuwanie krzywej rezonansu) i określaniu częstotliwości charakterystycznych punktów krzywej rezonansowej (jest to środek ekranu, jeśli krzywa rezonansowa ustawiona jest symetrycznie względem tego środka) przełączając na moment pomiaru wobulator w tryb pracy AM i pomiar za pomocą częstotlicznika częstotliwości fali nośnej. Metoda ta jest zalecana na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 8



Rys. 9

3. Źródła błędów w pomiarach wobulatorowych

Charakterystyki rezonansowe badane za pomocą zestawu wobuloskopowego różnią się nieco od charakterystyk otrzymanych metodą „punkt po punkcie”, tj. w warunkach quasi-statycznych. Powstałe błędy wynikają z dynamicznego sposobu pomiaru. Błędy te są pomijalnie małe, jeżeli szerokość pasma obwodu jest większa od 1/4 szerokości obrazu. Wpływ szybkości przemiatania na obraz krzywej rezonansu pokazano na rys.9. Oprócz błędów wynikających z dynamicznej metody pomiarowej mogą wystąpić błędy spowodowane przez:

- wahania amplitudy sygnału wobulatora w wybranym zakresie częstotliwości,
- nieliniowość charakterystyki modulacji częstotliwości,
- wpływ stałej czasu sondy w.cz.,
- nieliniową charakterystykę przetwarzania sondy w.cz..

Pytania kontrolne

1. Omówić wpływ rezystancji źródła i obciążenia na własności obwodów rezonansowych. Podać sposoby zmniejszenia tego wpływu.
2. Porównać własności obwodów sprzężonych z własnościami obwodów pojedynczych.
3. Jakie są typowe zastosowania obwodów rezonansowych?
4. Narysować wykresy wskazowe dla szeregowego i równoległego obwodu rezonansowego dla $f < f_0$, $f = f_0$, $f > f_0$.

5. Sformułować definicję (energetyczną) dobroci obwodu rezonansowego.
6. Podać definicję rezystancji charakterystycznej obwodu rezonansowego.
7. Obliczyć dobroć szeregowego obwodu rezonansowego ($R, L, C = 200 \text{ pF}$), jeżeli po przyłożeniu do jego zacisków napięcia o częstotliwości rezonansowej $f_0 = 50 \text{ kHz}$ zmierzono prąd I_0 , a następnie przestrojono obwód zmieniając pojemności C na 210 pF i zmierzono prąd $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.
8. Narysować w zależności od ω przebieg modułu napięcia na elementach szeregowego obwodu rezonansowego pobudzanego idealnym źródłem napięciowym. W jaki sposób wpływa dobroć Q obwodu na kształt tych charakterystyk.
9. Wartości elementów szeregowego obwodu rezonansowego wynoszą $R = 5 \Omega$, $L = 0,25 \text{ mH}$, $C = 4 \text{ nF}$. Wyznaczyć pulsację rezonansową, rezystancję charakterystyczną oraz dobroć tego obwodu. Obliczyć również dolną i górną pulsację graniczną na poziomie 3-dB stosując wzory dokładne i przybliżone.
10. Wyjaśnić pojęcie uniwersalnej krzywej rezonansowej.

Literatura

- [1] URUSKI M., WOLSKI W., Teoria obwodów, skrypt PWr., rozdz. 5.11.
[2] OSIOWSKI J., SZBATIN J., Podstawy teorii obwodów, WNT, Warszawa 1995.