

## POMIARY IMPEDANCJI

## WPROWADZENIE

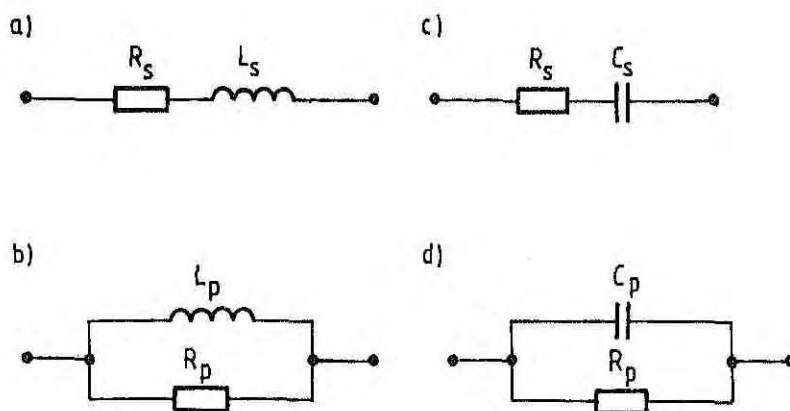
Elementy dwuzaciskowe, czyli dwójniki, charakteryzuje impedancja  $Z$  lub admitancja  $Y$ , które definiuje się dla sygnałów harmoniczných jako  $Z = U/I$  oraz  $Y = I/U$  (zatem  $Y = 1/Z$ ), przy czym  $U$ ,  $I$  mogą oznaczać wartości skuteczne lub amplitudy odpowiednio napięcia na dwójniku i natężenia prądu płynącego przez dwójnik.

Impedancja i admitancja dwójnika może zależeć od napięcia lub prądu (element nieliniowy) lub nie zależeć od nich (element liniowy). Tutaj ograniczono się do pomiarów impedancji elementów liniowych, gdyż metody pomiaru tych elementów dają się często zastosować (po pewnych modyfikacjach) również w przypadku elementów nieliniowych.

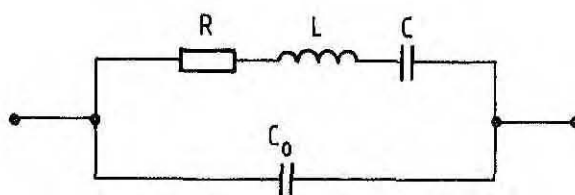
Proste idealne elementy bierne wykazują tylko jedną właściwość i dlatego charakteryzuje je tylko jedna wielkość: oporność  $R$ , indukcyjność własna  $L$  lub pojemność  $C$ . Natomiast proste elementy rzeczywiste, uznane za opornik, cewkę lub kondensator, charakteryzuje impedancja  $Z = R + jX$  o niezerowej rezystancji  $R$  i reaktancji  $X$  lub admitancja  $Y = G + jB$  o niezerowej konduktancji  $G$  i susceptancji  $B$ . Element taki musi być więc traktowany jak złożony dwójnik. Nawet w przypadku elementów liniowych, do których tu się ograniczono, części rzeczywista i urojona impedancji  $Z$  lub admitancji  $Y$  są złożonymi funkcjami częstotliwości. Jeśli przyjąć, że  $R = R_z$ ,  $X = \omega L_z$  lub  $X = -1/\omega C_z$ , gdzie  $R_z$ ,  $L_z$ ,  $C_z$  są parametrami zastępczymi dwójnika, to element rzeczywisty można przedstawić za pomocą prostego schematu zastępczego, złożonego z szeregowego połączenia opornika  $R_z$  i cewki  $L_z$  (lub kondensatora  $C_z$ ), przy czym  $R_z$ ,  $L_z$ ,  $C_z$  są funkcjami częstotliwości; podobnie jest w przypadku admitancji  $Y$  i równoległego schematu zastępczego.

Tylko w niektórych przypadkach i w ograniczonym zakresie częstotliwości można przyjąć, że  $R_z$ ,  $L_z$ ,  $C_z$  nie zależą od częstotliwości (jest to więc właściwość lokalna) i na podstawie znajomości tych parametrów, np. dla układu szeregowego  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $C_s$  z rys.4.1a i 4.1c można wyznaczyć parametry równoważnego mu układu równoległego  $R_p$ ,  $L_p$ ,  $C_p$  z rys.4.1b i 4.1d (lub odwrotnie), które jednak nie są już stałymi, lecz funkcjami częstotliwości. Istotnym problemem jest więc wybór między szeregowym a równoległym schematem zastępczym dwójnika, jeśli ma on poprawnie opisywać rzeczywisty element w pewnym zakresie częstotliwości, a nie przy jednej określonej częstotliwości.

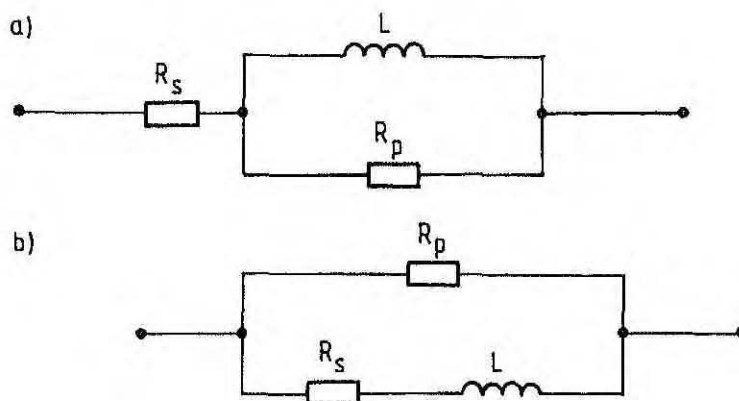
W pewnych przypadkach, dla znanej zależności impedancji rzeczywistego elementu od częstotliwości, można podać schemat zastępczy zawierający więcej niż dwa elementy zastępcze. Postuluje się tak np. w przypadku rezonatorów kwarcowych (rys.4.2) lub cewek rzeczywistych (rys.4.3) przy ustalaniu optymalnych warunków ich pracy.



Rys. 4.1



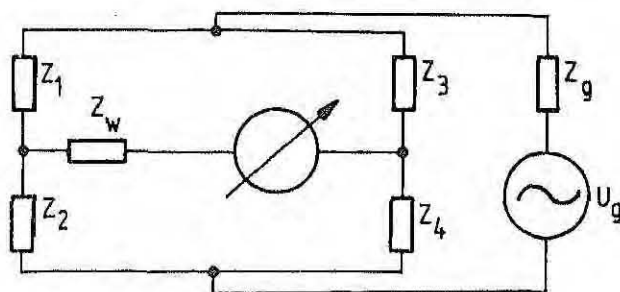
Rys. 4.2



Rys. 4.3

Rzeczywiste elementy o różnych od zera rezystancji i reaktancji charakteryzuje się często przez podanie tangensa kąta stratności, zdefiniowanego jako stosunek mocy czynnej traconej w rezystancji czynnej  $R$  do mocy biernej w reaktancji  $X$ :  $\operatorname{tg} \delta = P/Q = R/X$ . Odwrotność  $\operatorname{tg} \delta$  nazywa się niekiedy dobrocią  $Q$  (np. cewki lub kondensatora).

Pomiary impedancji przy znanych częstotliwościach pozwalają wyznaczyć parametry elementów schematu zastępczego badanego dwójnika. Głównymi metodami pomiaru impedancji w zakresie małych częstotliwości i radiowych częstotliwości są metody mostkowe i rezonansowe, choć używa się też metody zwanej niekiedy techniczną) pomiaru napięcia podczas przepływu znanego prądu przez mierzony element.



Rys. 4.4

Podstawowy układ mostka prądu zmiennego przedstawiono na rys.4.4, na którym obok impedancji ramion mostka  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  uwzględniono również impedancję generatora  $Z_g$  i impedancję wskaźnika równowagi  $Z_w$ . Natężenie prądu płynącego przez wskaźnik zera  $I_w = Y_{gw} U_g$  jest równe zero (stan równowagi mostka), gdy admitancja wzajemna (transadmitancja)  $Y_{gw}$  między gałęzią generatora i gałęzią wskaźnika zera jest równa zero. Zachodzi to wtedy, gdy impedancje ramion mostka spełniają równanie:  $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ , zwane warunkiem równowagi mostka.

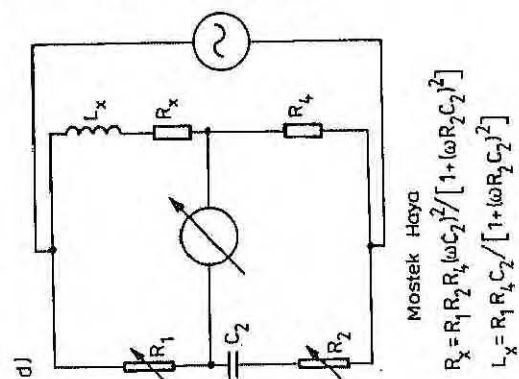
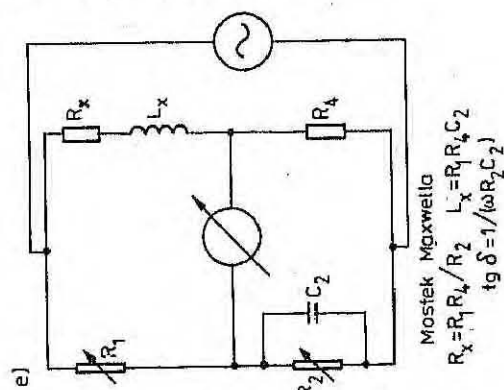
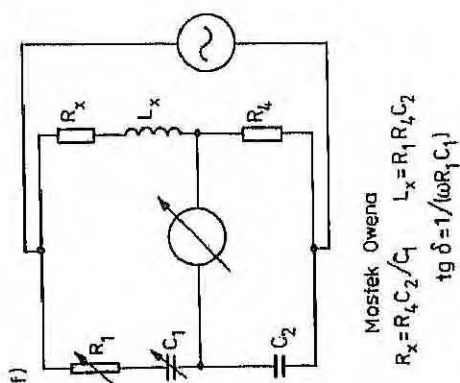
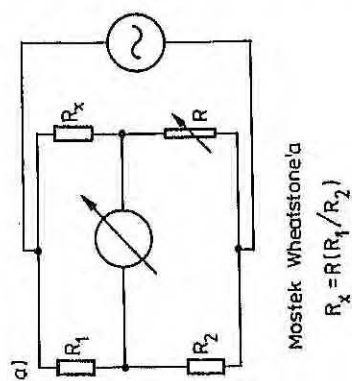
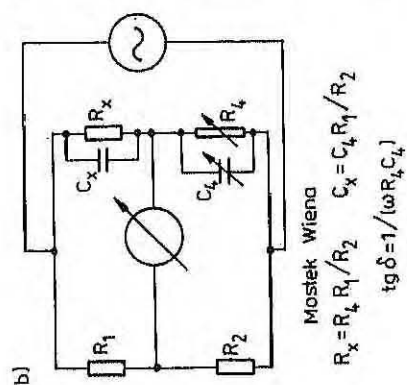
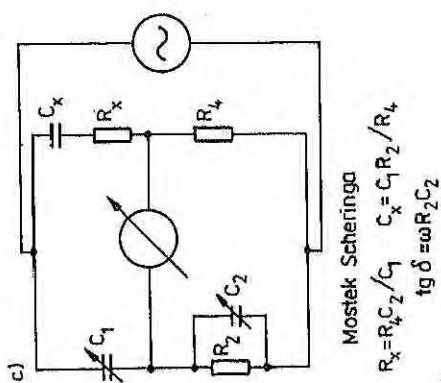
Ponieważ  $Z_i = R_i + jX_i = |Z_i| e^{j\varphi_i}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  są wielkościami zespolonymi, to warunek równowagi mostka można przedstawić w postaci:

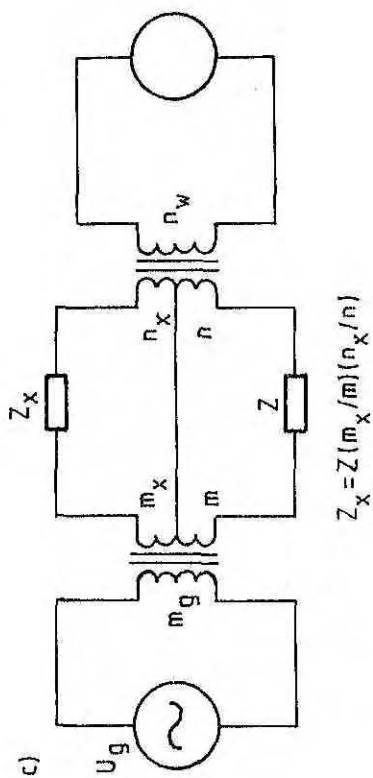
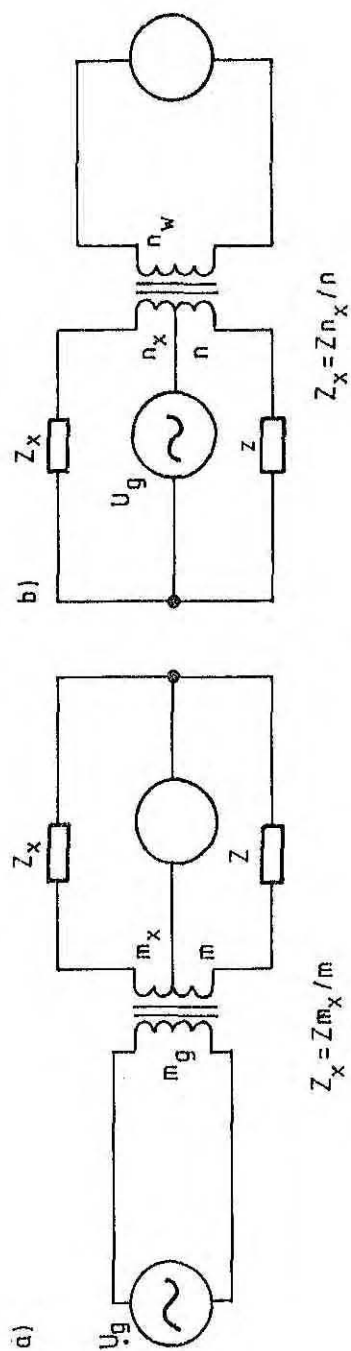
$$\begin{cases} \text{pary równań} \\ \begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \\ R_1 X_4 - X_1 R_4 = R_2 X_3 - X_2 R_3 \end{cases} \end{cases} \quad \begin{cases} \text{lub pary równań} \\ \begin{cases} |Z_1| \cdot |Z_4| = |Z_2| \cdot |Z_3| \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases} \end{cases}$$

Spełnienie każdej z tych par równań wymaga możliwości zmiany co najmniej dwóch parametrów impedancji ramion, a więc dwóch elementów regulowanych. Ta okoliczność wyróżnia i utrudnia proces równoważenia mostka prądu zmiennego w porównaniu z mostkiem prądu stałego; elementy regulowane muszą bowiem zachować wszystkie właściwości wzorca.

Zależnie od typu mierzonej wielkości:  $Z_x = R_x + jX_x$  czy  $Y_x = G_x + jB_x$ , zakresu mierzonych wielkości, częstotliwości pracy, potrzeby polaryzacji mierzonego elementu napięciem lub prądem stałym, możliwości ekranowania lub uziemienia i innych czynników, w praktyce stosuje się wiele różnych układów mostkowych. Kilka z nich, częściej spotykanych w laboratoriach, podano na rys.4.5.

Jeśli w warunku równowagi nie występuje częstotliwość, to mostek taki daje się zrównoważyć za pomocą zastosowanych w nim elementów regulowanych przy dowolnej częstotliwości, a więc może być zasilany z generatora napięć nieharmonicznych.





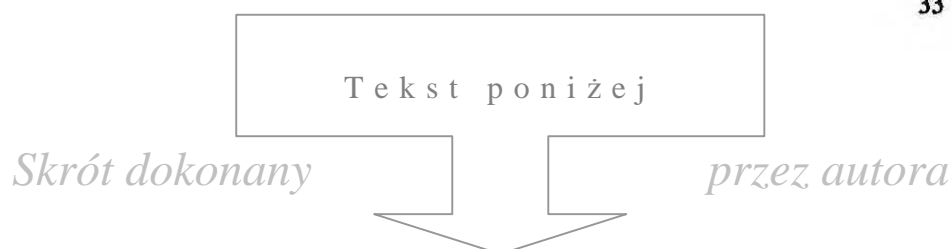
Rys. 4.6

nych. W przeciwnym przypadku bądź napięcie z generatora musi być harmoniczne, bądź wskaźnik zera musi być selektywny i dostrojony do częstotliwości podstawowej napięcia wyjściowego generatora napięć nieharmonicznych. Należy zauważyć, że jeśli którykolwiek parametr mostka, w tym nie znany, zależy od częstotliwości, to częstotliwość występuje w warunku równowagi mostka w sposób niejawny.

Ważną grupę mostków stanowią mostki transformatorowe przedstawione na rys.4.6. Ich główne zalety to: a) łatwość zmian zakresu pomiaru przez zastosowanie uzwojeń z odczepami, przy zachowaniu niewielkiej liczby wzorców, b) stałość czasowa i temperaturowa stosunków liczb zwojów, c) możliwość optymalnego doboru wzorca pod względem stałości w czasie i wymiarów.

Równoważenie mostka prądu zmiennego o dwóch regulowanych elementach wymaga kolejnej regulacji obu parametrów w kierunku minimalizacji napięcia  $U_w$  na wskaźniku zera.

*Skrót dokonany przez autora*



O dokładności pomiarów mostkowych decydują: 1) dokładności wzorców wprowadzające błąd systematyczny, 2) czułość mostka wprowadzająca błąd nieczułości, 3) czynniki pasożytnicze: sprzężenia pojemnościowe, upływności, oporności styków i przewodów doprowadzających itd. Błąd systematyczny wyznacza się metodą różniczki zupełnej, natomiast błąd nieczułości sprowadza się zwykle do wartości nie przekraczającej 0,1 błędu systematycznego, dobierając odpowiednio czuły wskaźnik lub niezbędną czułość napięciową lub prądową mostka [2].

Na dokładność pomiaru wpływają w dużym stopniu sprzężenia pojemnościowe, pojawiające się wskutek tego, że każdy element mostka, z generatorem i wskaźnikiem zera włącznie, charakteryzuje pewna pojemność między tym elementem i masą, a także danego elementu względem innych. Przy małych częstotliwościach pojemności te można uważać za skupione. Wpływ pasożytniczych sprzężeń pojemnościowych ogranicza się przez użycie ekranów - pojedynczych lub podwójnych. Istotne jest to, że ekranowanie nie usuwa sprzężeń, lecz jedynie ustala ich wielkości; pojemności

pasożytnicze nie zależą wtedy np. od zmian położenia ekranowanych elementów względem siebie.

### *Skrót dokonany przez autora*

Na zakończenie należy stwierdzić, że przedstawione tu mostki należą do grupy mostków zrównoważonych. Pozostałe grupy stanowią mostki niezrównoważone i mostki automatyczne. Mostki niezrównoważone służą do pomiaru zmian impedancji nieznanego elementu, a ich działanie polega na tym, że przed zmianą impedancji mostek zostaje zrównoważony, zaś o zmianie impedancji informuje napięcie wyjściowe mostka. Wtedy wskaźnik zera musi być woltomierzem fazoczułym, którego wskazania dają podstawę do wyznaczenia zmiany mierzonej impedancji. W mostkach automatycznych wykorzystuje się ujemne sprzężenie zwrotne: różne od zera napięcie wyjściowe mostka stanowi sygnał sprzężenia zwrotnego, które oddziałuje na jeden z elementów mostka (element sterowany) w taki sposób, by sprowadzić do minimum napięcie wyjściowe mostka.

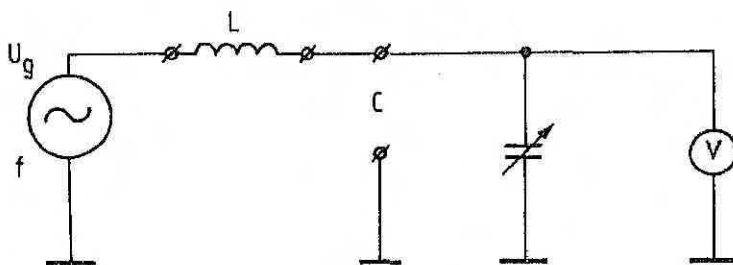
Rezonansowe metody pomiaru impedancji wykorzystuje się przy częstotliwościach radiowych w tzw. miernikach dobroci, czyli Q-metrach. Zasada działania Q-metru jest następująca (rys.4.12). Generator napięcia harmonicznego o amplitudzie  $U_g$  i znanej częstotliwości  $f$  dołączony jest do obwodu szeregowego LC. Zewnętrzna cewka o indukcyjności własnej  $L$  dołączona jest do zacisków przyrządu oznaczonych „L”, zaś zmienny kondensator wzorcowy, wbudowany do przyrządu, jest wycechowany. Jeśli obwód dostroić do rezonansu przez zmianę  $C$  (przy stałej i znanej częstotliwości  $f$ ), to amplituda napięcia na kondensatorze w stanie rezonansu  $U$  jest miarą dobroci obwodu (gdyż wtedy  $U = U_g Q$ ), zaś pojemność  $C$  może być



Tekst poniżej

*Skrót dokonany*

*przez autora*

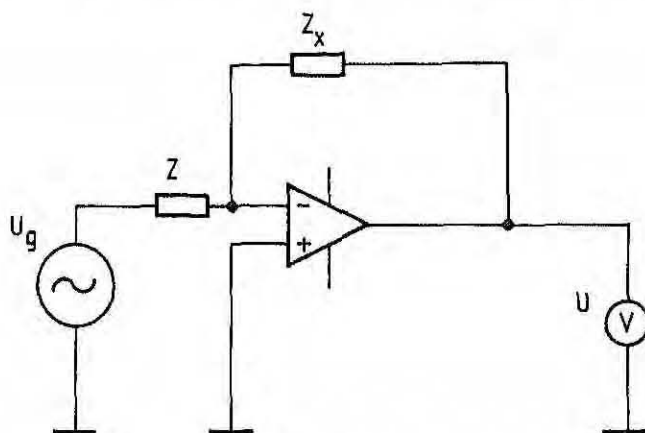


Rys. 4.12

miarą indukcyjności  $L_x$  (gdyż  $C = 1/4\pi^2 f^2 L_x$ ), a więc kondensator  $C$  można wycechować w jednostkach indukcyjności na odpowiedniej skali. Ponieważ zwykle dobroć kondensatora jest znacznie większa od dobroci cewki, to o wyniku pomiaru dobroci obwodu decyduje dobroć cewki  $Q_x = \omega L_x / R_x$ , gdzie  $R_x$  jest opornością strat cewki, zwykle znacznie większą od oporności reszty obwodu, zwłaszcza generatora.

Za pomocą Q-metru można również mierzyć pojemności. Niezbędne jest wówczas dołączenie cewki zewnętrznej, ale jej indukcyjność nie musi być znana. Częstotliwość drgań generatora jest stała podczas pomiaru. Obwód bez mierzonego kondensatora  $C_x$  dostraja się do rezonansu i notuje pojemność  $C_1$ , a następnie powtarza się procedurę po dołączeniu kondensatora  $C_x$ , notując wynik  $C_2$ ; wówczas  $C_x = C_1 - C_2$ . Można też zmierzyć pojemność własną cewki, wyznaczając zależność pojemności  $C$  kondensatora wzorcowego od częstotliwości  $f$ . Następnie ekstrapolując wykres  $C = f(1/\omega^2)$  do przecięcia z osią  $C$  wyznacza się pojemność własną cewki. Oporności (przewodności) oblicza się na podstawie zmian dobroci obwodu rezonansowego z dołączonym, mierzonym elementem i bez niego.

Metoda pomiaru impedancji na podstawie pomiaru napięcia  $U$  podczas przepływu znanego prądu przez tę impedancję stosowana jest w prostych miernikach impedancji, w których wykorzystane są wzmacniacze operacyjne (rys. 4.13). Jeśli



Rys. 4.13

pominie się napięcie między zaciskami samego wzmacniacza operacyjnego, równe  $U/A$ , gdzie  $A$  jest wzmocnieniem wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego oraz prądy wejściowe wzmacniacza operacyjnego, to prąd płynący przez znaną impedancję  $Z$ , równy  $U_g/Z$ , popłynie też przez impedancję  $Z_x$ , dając na wyjściu napięcie  $U = -U_g Z_x / Z$ , które przy znanych i stałych  $U_g$  i  $Z$  jest proporcjonalne do  $Z_x$ . Jeśli np.  $Z = R$ , zaś  $Z_x = j\omega L_x$ , to  $U = -U_g j\omega L_x / R$  i miarą  $L_x$  jest moduł napięcia wyjściowego  $U$  przy znanych  $U_g$ ,  $R$ ,  $\omega$ . Przy pomiarach pojemności zamienia się miejscami  $Z$  i  $Z_x$ . Podaną tu zasadę wykorzystano w używanym w Laboratorium cyfrowym mierniku RLC typu E-317, w którym napięcie  $U$  mierzy się woltomierzem cyfrowym.

## WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Zmierzyć charakterystyczne parametry cewki i kondensatora mostkiem RLC typu E-303. Ocenić błąd nieczułości mostka.
2. Za pomocą Q-metru typu MQL-5 zmierzyć indukcyjność, dobroć i pojemność własną cewki, a także pojemność kondensatora.
3. Zmierzyć indukcyjność cewki i jej oporność oraz pojemność kondensatora cyfrowym miernikiem RLC typu E-317. Określić dokładność.
4. Zestawić otrzymane wyniki, ich dokładność oraz warunki pomiaru. Porównać wyniki uzyskane różnymi metodami. Podać wnioski dotyczące odpowiednich schematów zastępczych mierzonych elementów.

## ZADANIA DO OPRACOWANIA

1. Wyznaczyć admitancję wzajemną (transadmitancję)  $Y_{gw}$  dla jednego z mostków z rys.4.5 ( $I_w = Y_{gw}U_g$ , przyjmując  $Z_g = 0$ ; oznaczenia z rys.4.4).
2. Wyprowadzić zależności podane na rys.4.5 dla jednego z mostków.
3. Wyprowadzić warunki równowagi mostków transformatorowych z rys.4.6, zakładając pełne sprzężenie magnetyczne między uzwojeniami.
4. Wyznaczyć natężenie prądu w obwodzie szeregowym RLC i napięcia na jego elementach oraz sporządzić wykres wskazowy dla  $\omega < \omega_0$ ,  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega > \omega_0$ . Wartości  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $U_g$ ,  $\omega$  są znane.
5. W zadaniu poprzednim wyrazić wyniki przez dobroć obwodu  $Q$  oraz rozstrojenie względne  $v = (\omega/\omega_0) - (\omega_0/\omega)$  i sporządzić wykresy  $|U_L|$ ,  $|U_C|$ ,  $|U_R|$ ,  $|I|$  w funkcji rozstrojenia względnego  $v$ , a także zakładając, że  $Q \gg 1$  sporządzić wykresy tych samych wielkości w funkcji rozstrojenia  $\Delta\omega$  ( $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ ).
6. Podać ograniczenia rezonansowych metod pomiaru impedancji za pomocą Q-metru.

## LITERATURA

- [1] A. Marcyniuk, E. Pasecki, M. Pluciński, B. Szadkowski: Podstawy metrologii elektrycznej. WNT, Warszawa 1984.
- [2] W. Kwiatkowski, J. Oleńdzki: Laboratorium miernictwa elektrycznego. Część II. Ćwiczenia. WPW, Warszawa 1983.