

Ćwiczenie 4.

Pomiary impedancji

Opracowali mgr inż. Leszek Widomski oraz mgr inż. Adam Czerwiński

Pierwotne wersje ćwiczenia i instrukcji są dziełem mgr inż. Leszka Widomskiego

Celem ćwiczenia jest zaznajomienie się z podstawowymi metodami pomiaru impedancji i poznanie właściwości praktycznie używanych elektronicznych przyrządów pomiarowych służących do pomiaru oporności, indukcyjności i pojemności w różnych zakresach częstotliwości.

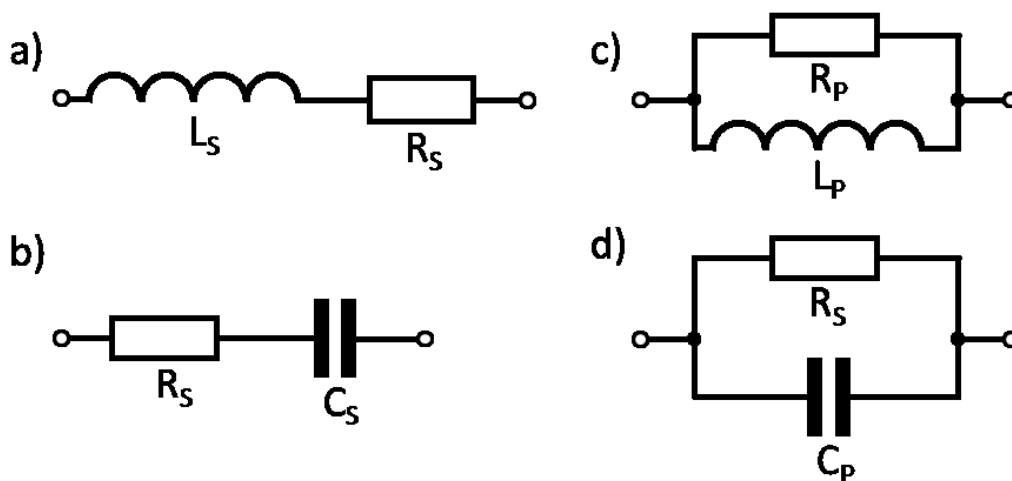
Wprowadzenie

Elementy dwuzaciskowe, czyli dwójniki, zwykło dzielić się pod względem właściwości energetycznych na czynne, czyli zawierające elementy zachowujące się jak źródła energii sygnałów, i bierne, czyli pozbawione takich źródeł. Bierne dwójniki charakteryzuje impedancja Z lub admitancja Y , które definiuje się dla sygnałów harmonicznym jako odpowiednio $Z=U/I$ oraz $Y=I/U$, skąd wynika, że $Y=1/Z$, przy czym U , I mogą oznaczać zespolone wartości skuteczne lub zespolone amplitudy odpowiednio napięcia na dwójniku i natężenia prądu płynącego przez dwójnik.

Impedancja i admitancja dwójnika może zależeć od napięcia lub natężenia 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.

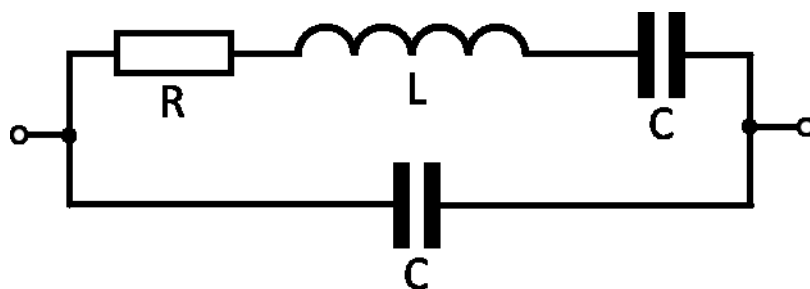
Proste idealne elementy bierne wykazują tylko jedną właściwość i dlatego charakteryzuje je tylko jedna wielkość: oporność R , indukcyjność własna L lub pojemność C . Natomiast proste elementy rzeczywiste, uznane za opornik, cewkę lub kondensator, charakteryzuje impedancja $Z=R + jX$, o niezerowej rezystancji R i reaktancji X , lub admitancja $Y=G+jB$ o niezerowej konduktancji G i susceptancji B . Element rzeczywisty musi być więc traktowany jako złożony dwójniki. Nawet w przypadku elementów liniowych, do których tu się ograniczono, części rzeczywista i urojona impedancji Z lub admitancji Y są złożonymi funkcjami częstotliwości. Jeżeli 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. Równoważność dwójników jest więc właściwością lokalną, a nie globalną w dziedzinie częstotliwości.

Tylko w niektórych przypadkach i w ograniczonym zakresie częstotliwości można przyjąć, że R_z , L_z , C_z nie zależą od częstotliwości (własność lokalna) i na podstawie znajomości tych parametrów, n.p. dla układów szeregowych R_s , L_s , C_s , z rys. 1a i 1c można wyznaczyć parametry równoważnych układów równoległych R_p , L_p , C_p , z rys. 1b i 1d (lub odwrotnie); parametry układów równoważnych nie są już jednak stałymi lecz są funkcjami częstotliwości. Istotnym problemem jest więc wybór między szeregowym i równoległym schematem zastępczym dwójnika, zapewniający poprawny opis rzeczywistego elementu w pewnym zakresie częstotliwości, a nie przy jednej określonej częstotliwości.

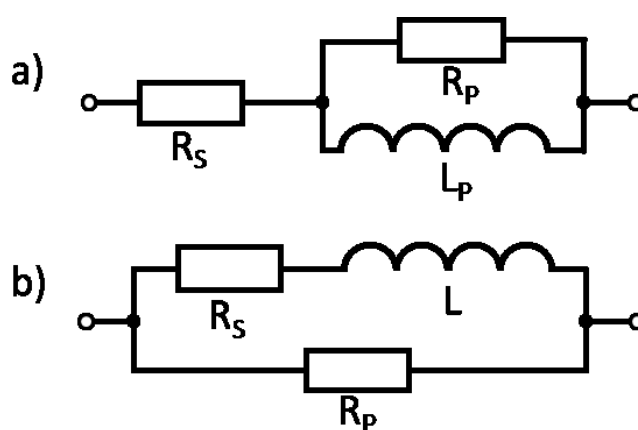


Rys. 1

W pewnych przypadkach, dla znanej zależności impedancji rzeczywistego elementu od częstotliwości, można podać schemat zastępczy zawierający więcej niż dwa elementy zastępcze. Postępuje się tak np. w przypadku rezonatorów kwarcowych (rys. 2) lub cewek rzeczywistych (rys. 3) przy ustaleniu optymalnych warunków ich pracy.



Rys. 2



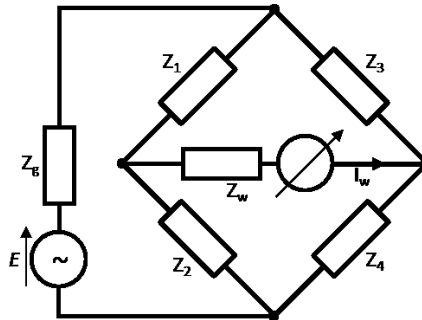
Rys. 3

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 R do mocy biernej w reaktancji X :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{Q} = \frac{R}{X}$$

Odwrotność $\operatorname{tg} \delta$ nazywa się niekiedy dobrocią Q (np. cewki lub kondensatora).

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



Rys. 4

Podstawowy układ prądu zmiennego przedstawiono na rys. 4, na którym zastosowano oznaczenia znane z metody symbolicznej analizy obwodów prądu sinusoidalnie zmiennego: zespolone amplitudy napięć i prądów oraz impedancje (wielkości zespolone). Na rysunku tym, 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) wtedy, gdy admitancja wzajemna (transadmitancja) Y_{gw} między gałęzią generatora i gałęzią wskaźnika równowagi jest równa zero. Zachodzi to wtedy, gdy impedancje ramion mostka spełniają równanie, zwane warunkiem równowagi mostka:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

Ponieważ impedancje:

$$Z_i = R_i + jX_i = |Z_i| e^{j\phi_i}$$

($i=1, 2, 3, 4$) są wielkościami zespolonymi, to warunek równowagi mostka można przedstawić w postaci jednej z dwóch par równań:

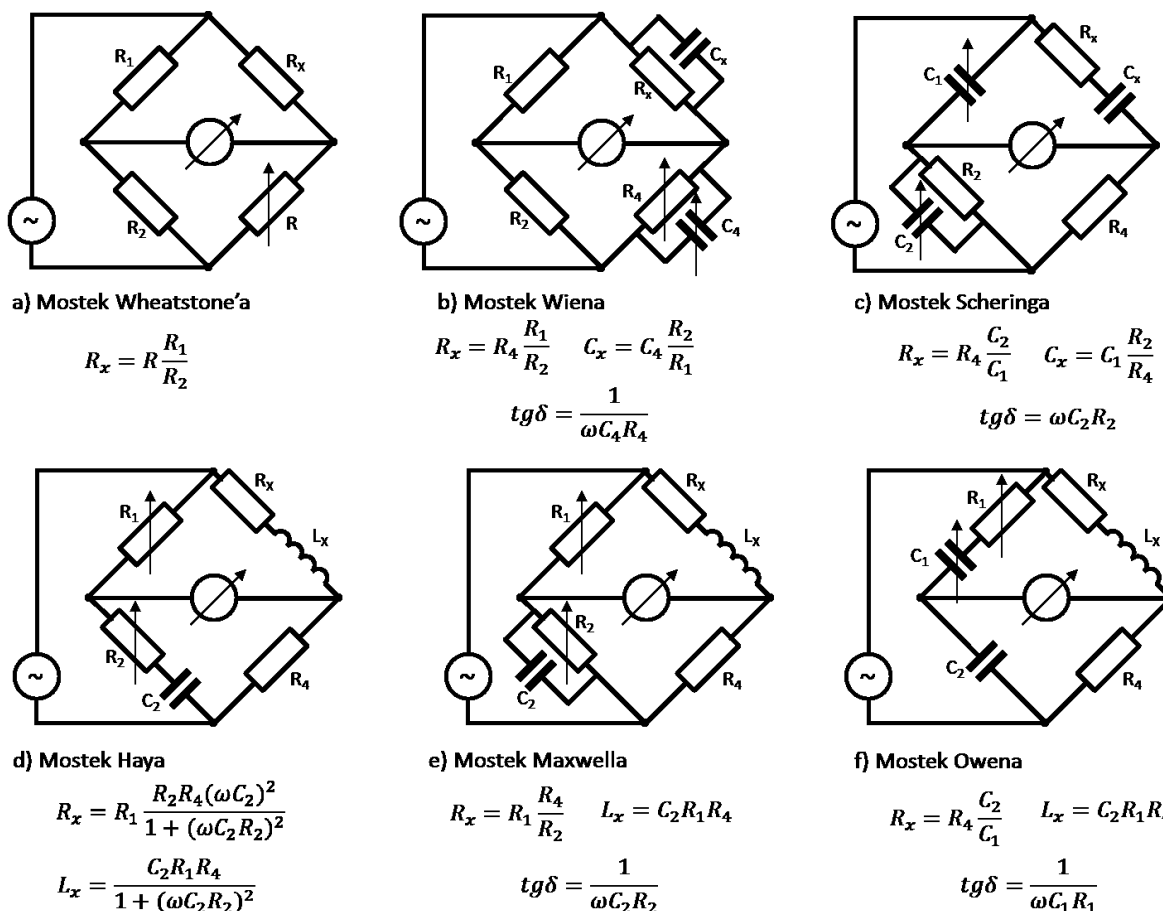
$$\begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \\ R_1 X_4 + X_1 R_4 = R_2 X_3 + X_2 R_3 \end{cases}$$

lub

$$\begin{cases} |Z_1| |Z_4| = |Z_2| |Z_3| \\ \phi_1 + \phi_4 = \phi_2 + \phi_3 \end{cases}$$

Zależenie 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 elementów mostka i innych czynników, w praktyce

stosuje się wiele różnych układów mostkowych. Kilka z nich, częściej spotykanych w laboratoriach, podano na rys. 5

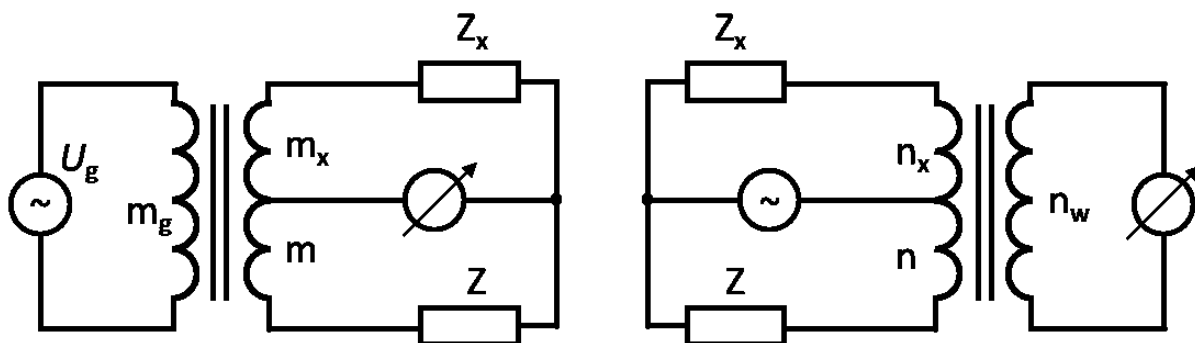


Rys. 5

Jeżeli w warunku równowagi nie występuje częstotliwość, to mostek taki daje się zrównoważyć za pomocą zastosowanych w nim elementów regulowanych przy dowolnej częstotliwości, a to oznacza, że mostek taki może być zasilany napięciem nieharmonicznym. W przeciwnym wypadku, bądź napięcie w generatorze musi być harmoniczne, bądź wskaźnik równowagi musi być selektywny i dostrojony do częstotliwości podstawowej napięcia wyjściowego generatora napięć nieharmonicznych. Należy zwrócić uwagę na to, że jeśli którykolwiek parametr mostka, w tym nieznan, zależy od częstotliwości, to częstotliwość występuje w warunku równowagi w sposób niejawni.

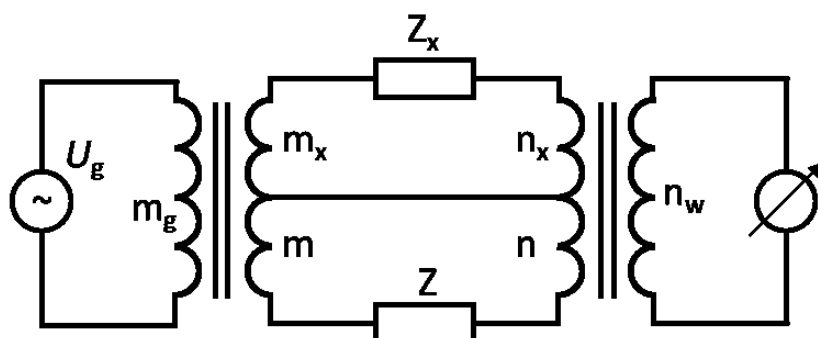
Ważną grupę mostków stanowią mostki transformatorowe przedstawione na rys. 6 Ich główne zalety to:

- Łatwość zmian zakresu pomiaru przez zastosowanie uzwojeń z odczepami, przy zachowaniu niewielkiej liczby wzorców
- Stałość czasowa i temperaturowa stosunków liczby zwojów wpływających na wynik pomiaru
- Możliwość optymalnego doboru wzorca pod względem stałości w czasie i wymiarów



a)
$$Z_x = \frac{m_x}{m} Z$$

b)
$$Z_x = \frac{n_x}{n} Z$$



c)
$$Z_x = \frac{m_x}{m} \frac{n_x}{n} Z$$

Rys. 6

Równoważenie mostka prądu zmiennego o dwóch regulowanych elementach wymaga kolejnej regulacji obu parametrów w kierunku minimalizacji wskazania napięcia U_w na wskaźniku zera. Dokładniejsza analiza tego procesu wskazuje (patrz np. W. Kwiatkowski, J. Olędzki – Laboratorium miernika elektrycznego, część II, Ćwiczenia, Wyd. P.W., Warszawa (1983)), że w pewnych warunkach podaną metodą kolejnych przybliżeń, mostka prądu zmiennego nie można zrównoważyć; zamiast zera osiąga się minimum wskazań.

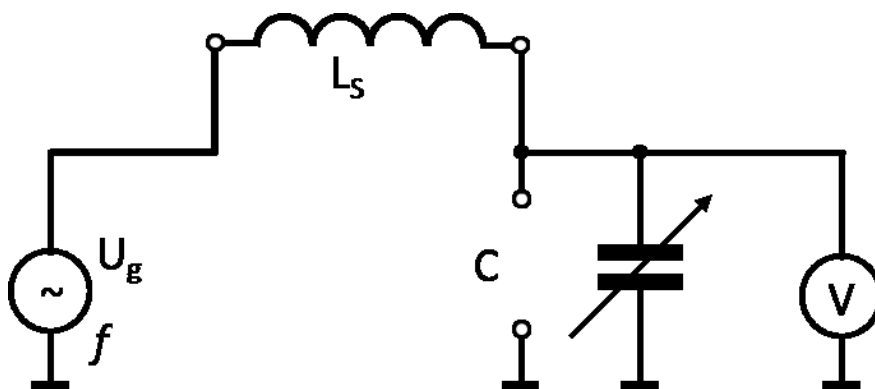
Dokładność pomiarów mostkowych jest bardzo duża. O jej ograniczeniach decydują:

- dokładności wzorców wprowadzające błąd systematyczny
- błąd nieczułości mostka wynikający z rozdzielczości i niezawodności elementów regulowanych
- czynniki pasożytnicze: sprzężenia pojemnościowe, upływności, oporności styków i przewodów doprowadzających itp.

Błąd systematyczny wyznacza się metodą różniczki zupełnej, natomiast błąd nieczułości sprowadza się zwykle do wartości nieprzekraczającej 0,1 błędu systematycznego względnego, dobierając odpowiednio czuły wskaźnik lub niezbędną czułość napięciową lub prądową mostka.

Na zakończenie należy stwierdzić, że przedstawione tu mostki należą do grupy mostków zrównoważonych. Pozostałe grupy stanowią mostki niezrównoważone i automatyczne. Mostki niezrównoważone służą do pomiaru zmian impedancji nieznanego elementu, a ich działanie polega na tym, że przed zmianą impedancji mostek zostaje zrównoważony, a następnie o zmianie impedancji informuje napięcie wyjściowe mostka. Wtedy wskaźnik równowagi musi być woltomierzem fazo czułym, którego wskazania umożliwiają wyznaczenie 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 tak zwanych miernikach dobroci, czyli Q-metrach. Zasada działania Q-metru jest następująca (rys. 7).



Rys. 7: Schemat ogólny miernika dobroci

Generator napięcia harmonicznego o amplitudzie U_g i znanej częstotliwości f dołączony jest do szeregowego obwodu rezonansowego LC. Zewnętrzna cewka o indukcyjności własnej L (znanej lub nieznanej) dołączona jest do zacisków oznaczonych „L”, zaś zmienny kondensator wzorcowy, wbudowany do przyrządu, jest wycechowany. Jeżeli obwód dostroić do rezonansu przez zmianę pojemności C (przy stałej i znanej częstotliwości f), to amplituda napięcia na kondensatorze w stanie rezonansu jest miarą dobroci obwodu (gdyż wtedy $U = U_g Q$, patrz Ćwiczenie 2. Obwody rezonansowe), zaś pojemność C może być miarą indukcyjności L_x :

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_x}$$

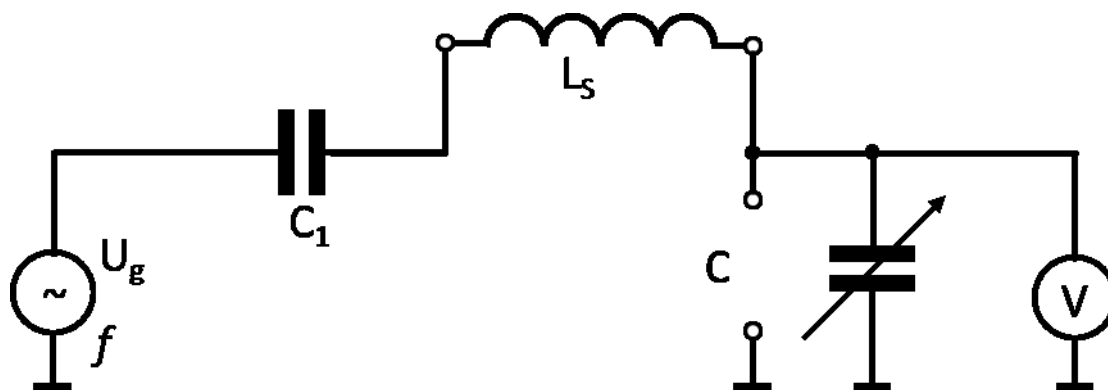
a więc kondensator C można wycechować w jednostkach indukcyjności na odpowiedniej skali. Ponieważ zwykle dobroć kondensatora jest znacznie większa od dobroci cewki, to o wyniku pomiaru dobroci obwodu decyduje dobroć cewki $Q_x = \omega L_x / R_x$, gdzie R_x jest opornością strat cewki, zwykle znacznie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

Za pomocą Q-metru można również zmierzyć pojemności. Niezbędne jest wówczas dołączenie cewki zewnętrznej. Pomiar polega na dostrojeniu obwodu do rezonansu, a następnie na podstawie znajomości częstotliwości rezonansowej oraz indukcyjności własnej cewki wyznacza się nieznaną pojemność. W pewnych warunkach do wyznaczenia nieznanej pojemności niepotrzebna jest znajomość ani indukcyjności cewki ani częstotliwości rezonansowej. Pomiar przebiega w dwóch krokach. Najpierw dostroja się obwód bez mierzonego kondensatora o pojemności C_x do rezonansu i notuje się pojemność C_1 kondensatora wzorcowego, przy której wystąpił rezonans. Następnie przy tej

samej częstotliwości powtarza się postępowanie po dołączeniu kondensatora C_x do obwodu, notując pojemność C_2 kondensatora wzorcowego, przy której wystąpił rezonans po zmienia obwodu. Zachodzi wówczas związek: $C_x = C_2 - C_1$

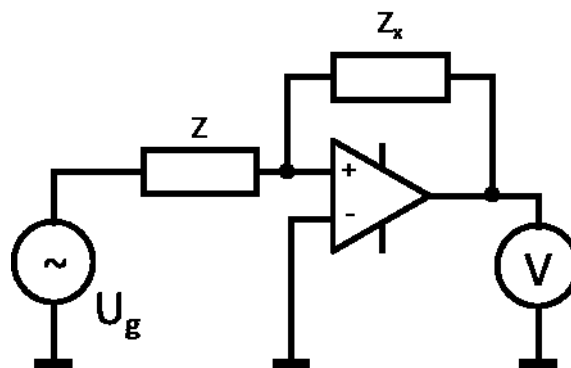
Q-metr pozwala również mierzyć pojemność własną cewki C_0 . Należy wtedy wyznaczyć zależność pojemności C kondensatora wzorcowego w stanie rezonansu w funkcji częstotliwości f drgań źródła. Następnie sporządza się wykres zależności $C = f(1/\omega^2)$ i z tego wykresu, ekstrapolując go do przecięcia się z osią pojemności, wyznacza się pojemność własną cewki C_0 .

Oporności lub przewodności badanych elementów wyznacza się za pomocą Q-metru na podstawie zmian dobroci obwodu rezonansowego z dołączanym mierzonym elementem i bez niego.



Rys. 8: Schemat ogólny Q-metru MQL- 5 wykorzystywanego w ćwiczeniu. $C_1 = 9500 \text{ pF}$

Techniczna metoda pomiaru impedancji na podstawie pomiaru napięcia U podczas przepływu prądu przez tę impedancję stosowana jest w prostych miernikach impedancji (pojemności i indukcyjności), w których wykorzystywane są wzmacniacze operacyjne (rys. 9)



Rys. 9

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

Wykonanie ćwiczenia

Każdy zespół otrzymuje do pomiarów 4 kondensatory (2 ceramiczne, papierowy i styrofleksowy) i dwie cewki, przy czym wszystkie kondensatory i jedną z cewek mierzy się na wszystkich przygotowanych przyrządach (wyniki w Tabeli 1), zaś drugą z cewek mierzy się tylko na wskazanym w Tabeli 2 mierniku RLC, ale pomiarów dokonuje się przy różnych częstotliwościach.

Należy zwrócić uwagę na różny sposób dołączenia badanych elementów do każdego z przyrządów ze względu na eliminację wpływu niesprawnych połączeń.

Podczas pomiarów należy zapisać z instrukcji przyrządów częstotliwość, przy której wykonywano pomiar. Podane poniżej tabele służą do przedstawienia wyników w sprawozdaniu.

Pomiary miernikiem LC typu HM8018 firmy Hameg.

1. Włączyć zasilanie przyrządu z sieci.
2. Do zacisków miernika dołączyć badany element, a następnie wybrać przełącznikiem mierzoną wielkość L lub C lub związany z tą wielkością parametr charakteryzujący stratność (R lub G).
3. Przełącznik zakresu ustawić w takim położeniu, by wykorzystane zostały wszystkie cyfry 3,5-cyfrowego wskaźnika ciekłokrystalicznego. Od położenia przełącznika zależy częstotliwość generatora używanego podczas pomiaru. Wynosi ona:
 - a. na zakresach oznaczonych jako 200 i 2000 pF/μH 16 kHz
 - b. na zakresach oznaczonych jako 20 i 200 nF/mH 1,6 kHz
 - c. na zakresach oznaczonych jako 2, 20 i 200 μF/H 160 Hz
4. Odczytać wartość wielkości mierzonej i zapisać ją wraz z odpowiednią jednostką fizyczną.
5. Z instrukcji obsługi wypisać wartości niepewności pomiaru.
6. Powtórzyć pomiary dla stratności charakterystycznej dla mierzonego elementu, przewidzianej przez producenta miernika (R lub G).

Pomiary miernikiem RLC typu E-317 firmy Meratronik

1. Włączyć zasilanie przyrządu z sieci.
2. Do zacisków miernika dołączyć badany element, a następnie wybrać przełącznikiem mierzoną wielkość L, C lub RC.
3. Przełącznikiem klawiszowym wybrać odpowiedni zakres pomiaru w ten sposób, by wykorzystane zostały wszystkie cyfry 3,5-cyfrowego wskaźnika na diodach świecących LED.
4. Odczytać wartość wielkości mierzonej i zapisać ją wraz z odpowiednią jednostką fizyczną.
5. Z instrukcji obsługi wypisać wartości niepewności pomiaru oraz częstotliwość, przy której wykonano pomiar.

Pomiary mostkiem C typu E-302 firmy Eureka

1. Włączyć zasilanie przyrządu z sieci.
2. Do zacisków miernika dołączyć badany element. Przełączniki z prawej strony powinny być w pozycjach odpowiednio: górny – „free”, dolny – „a-m”. Przełącznik zakresu pojemności powinien być w pozycji „x1”.
3. Czułość wskaźnika równowagi mostka można regulować i początkowo powinna być ustawiona na minimum, zaś podczas pomiarów czułość należy zwiększać.
4. Równoważenia mostka dokonuje się metodą kolejnych przybliżeń, tzn. sprowadza się wskazania wskaźnika równowagi mostka do minimum najpierw regulując pojemność

wbudowanego dekadowego kondensatora wzorcowego, a następnie regulując potencjometrem oznaczonym $tg\delta$ (zwykle regulacja skokowa oporności kompensującej straty nie jest konieczna). Pomiar powtarza się przy zwiększonej czułości wskaźnika równowagi, aż do uzyskania minimum wskazań tego wskaźnika.

5. Odczytać wartość nastawionej pojemności z uwzględnieniem położenia przełącznika zmiany zakresu pojemności, a także odczytać wartość $tg\delta$ mierzonego kondensatora z ustawienia potencjometru „ $tg\delta$ ”.
6. Z instrukcji obsługi wypisać wartości niepewności pomiaru oraz częstotliwość, przy której wykonano pomiar.

Pomiary Q-metrem typu MQL-5 firmy INCO

A. Przygotowanie Q-metru

1. Włączyć zasilanie przyrządu z sieci.
2. Przed rozpoczęciem pomiarów należy wyzerować wbudowany woltomierz. W tym celu przełącznik rodzaju pracy woltomierza na zakresie pomiaru Q „50” i pokręcając gałką potencjometru „▶ 0 ◀” ustawić wskazówkę nad działką oznakowaną „0” (zerowanie skali).
3. Od czasu do czasu należy sprawdzić kalibrację, ustawiając przełącznik w odpowiedniej pozycji. Sprawdza się, czy wskazówka woltomierza znajduje się nad zaznaczona kreską i w razie potrzeby śrubokrętem wstawionym w przygotowany otwór skoryguje się ustawienie wskazówki. Ta operacja powoduje ustawienie nominalnej wartości napięcia zmiennego zasilającego pomiarowy obwód rezonansowy.
4. Przełącznik rodzaju pracy woltomierza ustawić na zakresie pomiaru Q „50”

B. Elementy regulacyjne Q-metru

1. Q-metr umożliwia zmianę częstotliwości generatora (2 pokrętki z lewej strony) i pojemności kondensatora wzorcowego (2 pokrętki w części środkowej).
2. Częstotliwość generatora zmienia się dwustopniowo: skokowo przełącznikiem bębnowym, zaś w sposób ciągły kondensatorem wzorcowym wyposażonym w dwie skale A i B. Przełącznik bębnowy ma oznaczone zakresy zmian częstotliwości oraz litery A i B, służące do wyboru współpracujących z tym przełącznikiem skal regulacji ciągłej.
3. Zależnie od położenia przełącznika bębnowego na skalach A lub B odczytuje się ustawianą w sposób ciągły częstotliwość drgań generatora.
4. Regulacja pojemności wzorcowej jest ciągła i dwustopniowa: zgrubna w zakresie od 30 do 520 pF i dokładna w zakresie ± 5 pF, przy czym ta ostatnia wpływa na pierwszą, lecz nie odwrotnie, Kondensatory zmienne do owych regulacji są połączone równolegle.

C. Pomiar indukcyjności cewki

1. Do zacisków Q-metru usytuowanych na górze przyrządu i oznaczonych „L”, dołączyć badaną cewkę.
2. Doprowadzić do rezonansu w obwodzie szeregowym LC, kiedy to napięcie na kondensatorze wskazywane przez woltomierz osiąga maksimum (w razie potrzeby zmienić zakres pomiaru Q z „50” na „250” lub „500”). Można to osiągnąć bądź przy nieziennej pojemności kondensatora, bądź przy nieziennej częstotliwości generatora.
3. Na podstawie położenia elementów regulacyjnych odczytać wartości częstotliwości generatora i pojemności kondensatora wzorcowego, pozwalające obliczyć indukcyjność mierzonej cewki.
4. Zanotować dobroć cewki na podstawie położenia wskazówki miernika wyskalowanego bezpośrednio w jednostkach dobroci.

D. Pomiar pojemności kondensatora

1. Do zacisków Q-metru usytuowanych na górze przyrządu i oznaczonych „C”, dołączyć badany kondensator.
2. Do zacisków Q-metru usytuowanych na górze przyrządu i oznaczonych „L”, dołączyć wzorzec indukcyjności.
3. Doprowadzić do rezonansu w obwodzie szeregowym LC w podobny sposób, jak przy pomiarach indukcyjności (punkty 2 i 3).
4. W pewnych przypadkach, pomiaru pojemności można dokonać prościej, a mianowicie w dwóch stanach rezonansu uzyskanego przy tej samej częstotliwości drgań generatora, lecz przy różnych dostrojeniach do rezonansu za pomocą kondensatora. Należy wtedy zanotować obie wartości pojemności kondensatora wzorcowego.

E. Dokładności pomiarów

1. Z dostarczonych wyciągów z instrukcji obsługi przyrządu wynotować wszystkie informacje dotyczące niepewności pomiarów.
2. Przy obliczeniach uwzględniać szeregową pojemność sprzęgającą $C_1 = 9500 \text{ pF}$, ograniczającą zakres mierzonych pojemności. Pojemność rezonansową C_r wyznacza się na podstawie wskazań skal kondensatora pomiarowego C oraz powyższej wartości pojemności kondensatora sprzęgającego C_1 ze wzoru: $C_r = C_1 C / (C_1 + C)$
3. W przypadku bardzo precyzyjnych pomiarów w celu zwiększenia dokładności pomiarów dobroci uwzględnia się następujące poprawki:
 - a. poprawki ze względu na straty własne obwodu pomiarowego,
 - b. poprawki ze względu na pojemność własną cewki,
 - c. poprawki ze względu na pomiar napięcia na pojemności nieco różnej od pojemności rezonansowej obwodu
 - d. poprawki ze względu na wpływ indukcyjności własnej obwodu pomiarowego
 Sposób uwzględniania poprawek podany jest w pełnej instrukcji Q-metru

Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Celowość pomiarów impedancji do celów fizyki
2. Wykaz używanych przyrządów pomiarowych (nazwa, typ, producent)
3. Zasady działania poszczególnych przyrządów (2- 3 zdania + ewent. schemat ideowy)
4. Metody pomiaru i podstawowe zależności
5. Parametry rzeczywistych elementów tak przeliczone, aby umożliwić porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami przy użyciu różnych przyrządów (n.p. stratność wyrażoną przez r)
6. Pełne zestawienie wyników z uwzględnieniem stratności elementów (Tabela 1 poniżej) i z podaniem częstotliwości
7. Pomiary wybranej cewki przy różnych częstotliwościach miernikiem RLC typu MT 4090 firmy Motech (Tabela 2)
8. Wykresy wskazowe dla cewki z p.7 przy odpowiednio wybranej częstotliwości
9. Zadania do opracowania: 2, 4, 5, 6 (oznaczenia wg skryptu Wyd.P.W. – różowego)

Wyniki zebrane podczas ćwiczenia na:

1. Mierniku LC HAMEG HM8018,
 - a. L i r_L dla cewki
 - b. C i G dla kondensatorów

2. Mostku E-302
 - a. C i $\operatorname{tg}\delta$ dla kondensatorów
3. Q-metrze MQL 5
 - a. C dla kondensatorów
 - b. L i Q dla cewki

Przeliczyć i wraz z błędami pomiarowymi przedstawić w postaci Tabeli 1:

Tabela 1: Pomiary elementów L1, C1, C2, C3 i C4

	Miernik LC HM8018				Miernik RLC E-317				Mostek E-302				Q-metr MQL-5			
	L lub C	ΔL lub ΔC	r	f	L lub C	ΔL lub ΔC	r	f	L lub C	ΔL lub ΔC	r	f	L lub C	ΔL lub ΔC	r	f
L1																
C1																
C2																
C3																
C4																

Tabela 2: Pomiary miernikiem RLC typu MT 4090 firmy Motech

f[kHZ]	Z [Ω]	L _S [mH]	Θ ⁰	Q	D	ESR [Ω]
0,1						
1						
10						
100						
200						

Zadania do opracowania

1. Wyznaczyć zależności podane w skrypcie na rys. 5 polecane przez prowadzącego.
2. Wykreślić wykres wskazowy dla cewki z rdzeniem dla jednej wybranej częstotliwości z tabeli 2.
3. Wyznaczyć natężenie prądu w szeregowym obwodzie RLC i napięcia na jego elementach. Sporządzić wykresy wskazowe dla tych wielkości dla $\omega < \omega_0$, $\omega = \omega_0$, $\omega > \omega_0$, przyjmując, że R, L, C, U_g, ω są znane
4. Równania otrzymane w zadaniu 3 wyrazić poprzez dobroć Q i rozstrojenie względne ν

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$$

i sporządzić wykresy |I|, |U_C|, |U_L|, |U_R|. Otrzymane równania wyrazić w funkcji rozstrojenia $\Delta\omega = \omega - \omega_0$. Wskazówka: wyrazić $\nu = \nu(\Delta\omega)$ i podstawić do wzorów.

5. Podać ograniczenia rezonansowych metod pomiaru impedancji za pomocą Q-metru.