

Pomiary impedancji

Pomiary RLC

Część I

1

Cel: Zapoznać się z podstawowymi metodami pomiaru parametrów RLC na prądzie zmiennym

Plan:

- 1. Wstęp. Modeli obiektów badanych RLC.**
- 2. Pomiar RLC metodą techniczną 1.**
- 3. Niepewność wyników pomiaru parametrów RLC metodą techniczną 1.**
- 4. Przykłady**

2

Część II


Plan:

1. Pomiar RLC metodą techniczną 2: Pomiary watomierzem, woltomierzem i amperomierzem.
2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2
3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2.
4. Pomiar RLC metodą mostkową.
5. Cyfrowy miernik LCR typu MT4090.
6. Parametry metrologiczne miernika impedancji LCR typu MT4090
7. Niepewność pomiaru mostkiem MT4090
8. Pomiary mostkiem MT4090. Przykłady


3

1. Wstęp. Modeli obiektów badanych

Podstawowe elementy pasywne obwodów elektrycznych:

Rezystor – rezystancja R (m Ω , Ω , k Ω , M Ω ,...) 
- konduktancja $G = 1/R$ (kS, S, mS, μ S,...)

Kondensator - pojemność C (pF, nF, μ F,...) 

Cewka – indukcyjność L (μ H, mH, H) 

Impedancja (na prądzie sinusoidalnym): stosunek wartości napięcia do wartości prądu

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + j \cdot X$$

Admitancja (na prądzie sinusoidalnym): stosunek wartości prądu do wartości napięcia (odwrotność impedancji)

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{1}{\dot{Z}} = G + j \cdot B$$

4

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

1. Wstęp. Modeli obiektów badanych

Moduł Impedancji (na prądzie sinusoidalnym): stosunek wartości skutecznej napięcia do wartości stosunek wartości skutecznej prądu

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Moduł Admittancji : stosunek wartości prądu do wartości napięcia (odwrotność impedancji)

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z} = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Moduł impedancji obiektu idealnego:

Rezystora – $Z_R = R$

Kondensatora - $Z_C = X_C = 1/\omega C = 1/(2\pi f C)$

Cewki - $Z_L = X_L = \omega L = 2\pi f L$

Moduł admittancji obiektu idealnego:

Rezystora – $Y_R = 1/R = G$ (G – konduktancja)

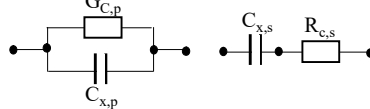
Kondensatora - $Y_C = B = \omega C = 2\pi f C$ (B – susceptancja)

Cewki - $Y_L = 1/X_L = Y_L = 1/\omega L = 1/2\pi f L$

5

1. Wstęp. Modeli obiektów badanych

Przy uproszczonych założeniach przy częstotliwościach do kilku dziesięć kiloherców obiekt pojemnościowy można przedstawić: układem zastępczym **równoległym** z części pojemnościowej C_x oraz przewodnościowej $G_{c,p}$ lub układem zastępczym **szeregowym** z części pojemnościowej C_x rezystancyjnej $R_{c,s}$



Admittancja pojemnościowego obiektu opisuje się wzorem

$$Y_{c,p} = G_{c,p} + jX_{c,p} = G_{c,p} + j\omega \cdot C_{x,p}$$

a impedancja układu zastępczego **szeregowego pojemnościowego** obiektu równa się

$$Z_{c,s} = R_{c,s} + j \cdot X_{c,s} = R_{c,s} + \frac{1}{j\omega \cdot C_{x,s}}$$

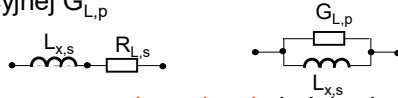
6

1. Wstęp. Modeli obiektów badanych

Przy uproszczonych założeniach przy częstotliwościach do kilku dziesięć kiloherców obiekt indukcyjny można przedstawić:

układem zastępczym **szeregowym** z części indukcyjnej L_x oraz rezystancyjnej $R_{L,s}$

lub układem **równoległym** zastępczym z części indukcyjnej L_x oraz konduktancyjnej $G_{L,p}$



Dla układu **szeregowego** impedancja indukcyjnego obiektu opisuje się wzorem

$$Z_{L,s} = R_{L,s} + j \cdot x_{L,s} = R_{L,s} + j\omega \cdot L_{x,s}$$

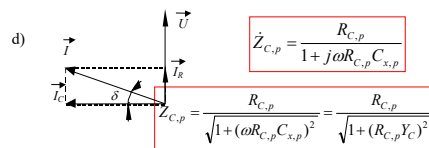
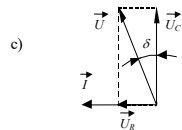
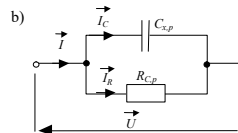
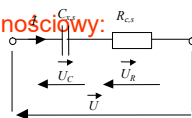
a admitancja układu **zastępczego równoległego** indukcyjnego obiektu równa się

$$Y_L = G_{L,p} + jx_{L,p} = G_{L,p} + \frac{1}{j\omega \cdot L_{x,p}}$$

7

1. Wstęp. Modeli obiektów badanych

Obiekt pojemnościowy:



$$\dot{Z}_{C,s} = R_{C,s} + \frac{1}{j\omega C_s}$$

$$Z_{C,s} = \sqrt{R_{C,s}^2 + \frac{1}{(\omega C_s)^2}} = \sqrt{R_{C,s}^2 + X_C^2}$$

$$\dot{Z}_{C,p} = \frac{R_{C,p}}{1 + j\omega R_{C,p} C_{x,p}}$$

$$\dot{Y} = \frac{1}{R_{C,p}} + j\omega C_{x,p} = G_{C,p} + j\omega C_{x,p}$$

$$Y_{C,p} = \sqrt{G_{C,p}^2 + (\omega C_{x,p})^2} = \sqrt{G_{C,p}^2 + Y_C^2}$$

Stratność obiektu pojemnościowego

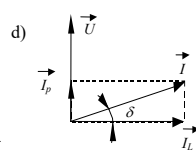
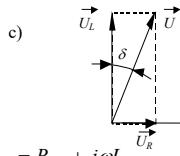
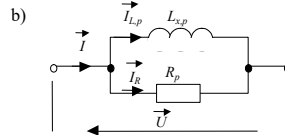
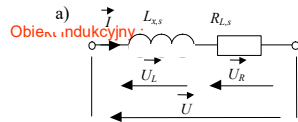
$$D_s = \operatorname{tg} \delta_s = \frac{U_{R,s}}{U_{C,s}} = \frac{R_{C,s}}{\frac{1}{\omega C_{x,s}}} = \omega R_{C,s} C_{x,s}$$

$$C_{x,p} = \frac{C_{x,s}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta^2}$$

$$D_p = \operatorname{tg} \delta_p = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R_{C,p}}{U\omega C_{x,p}} = \frac{1}{\omega R_{C,p} C_{x,p}}$$

8

1. Wstęp. Modeli obiektów badanych



$$\dot{Z}_{L,s} = R_{L,s} + j\omega L_{x,s} \quad Z_{L,s} = \sqrt{R_{L,s}^2 + (\omega L_{x,s})^2}$$

Dobroć obiektu indukcyjnego

$$\dot{Z}_{L,p} = \frac{1}{Y_{L,p}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{L,p}} + \frac{1}{j\omega L_{x,p}}}$$

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{1}{U_R / U_L} = \frac{\omega L_{x,s}}{R_{L,s}}$$

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{I_L}{I_R} = \frac{R_{L,p}}{\omega L_{L,p}}$$

$$L_{x,p} = L_{p,s} \left(1 + \frac{1}{Q^2} \right)$$

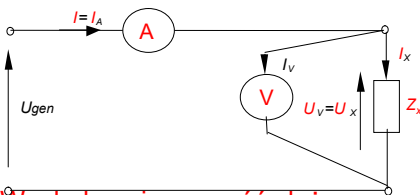
9

2. Pomiar impedancji metodą techniczną 1

Metoda techniczna : metoda amperomierza – woltomierza pomiaru modułu impedancji polega na oddzielnych pomiarach

- Prądu I – amperomierzem A
- Napięcia U – woltomierzem

Pomiary pośredni
poprawny pomiar napięcia



$$I_x \rightarrow I_A \quad U_x \rightarrow U_V$$

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x} \approx \frac{U_V}{I_A}$$

Względna niepewność złożona

$$u_{c,rel}(Z_x) = \sqrt{u_{rel}^2(U_V) + u_{rel}^2(I_A)} = \sqrt{\left(\frac{k_{I_V} \cdot U_{nV}}{\sqrt{3} \cdot U_V} \right)^2 + \left(\frac{k_{I_A} \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A} \right)^2}$$

Bezwzględna niepewność złożona

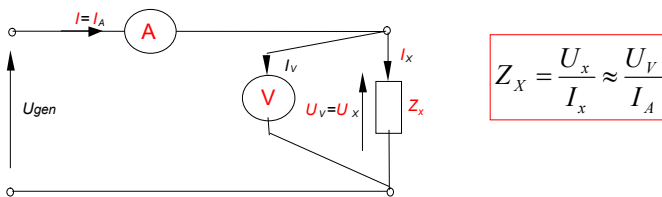
$$u_c(Z_x) = \frac{u_{c,rel}(Z_x)}{100\%} \cdot Z_x = \sqrt{\left(\frac{k_{I_V} \cdot U_{nV}}{\sqrt{3} \cdot U_V} \right)^2 + \left(\frac{k_{I_A} \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A} \right)^2} \cdot \frac{Z_x}{100\%}$$

10

2. Pomiar impedancji metodą techniczną 1

Metoda techniczna : metoda amperomierza – woltomierza pomiaru modułu impedancji polega na oddzielnych pomiarach

- Prądu I – amperomierzem A
- Napięcia U – woltomierzem V Pomiary pośrednie



$$Z_X = \frac{U_x}{I_x} \approx \frac{U_V}{I_A}$$

Błąd metodyczny (spowodowany ograniczoną rezystancją woltomierza $R_V \neq \infty$, prąd przez woltomierz $I_V \neq 0$)

$$\delta_{met, R_V} = \frac{I_V}{I_x} 100\% = \frac{I_V}{I_A - I_V} 100\% \approx \frac{Z_x}{R_V}$$

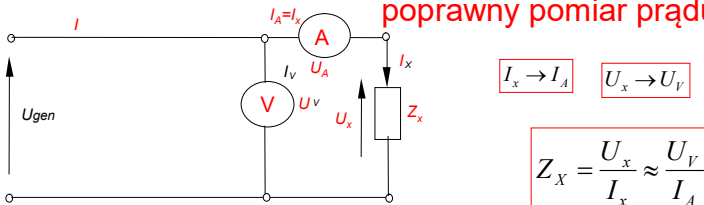
$$R_V \gg Z_x$$

11

2. Pomiar impedancji metodą techniczną 1

Metoda techniczna : metoda amperomierza – woltomierza pomiaru modułu impedancji polega na oddzielnych pomiarach

- Prądu I – amperomierzem A
- Napięcia U – woltomierzem Pomiary pośredni poprawny pomiar prądu



$$I_x \rightarrow I_A \quad U_x \rightarrow U_V$$

$$Z_X = \frac{U_x}{I_x} \approx \frac{U_V}{I_A}$$

Względna niepewność złożona

$$u_{c,rel}(Z_x) = \sqrt{u_{rel}^2(U_V) + u_{rel}^2(I_A)} = \sqrt{\left(\frac{kl_V \cdot U_{nV}}{\sqrt{3} \cdot U_V}\right)^2 + \left(\frac{kl_A \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A}\right)^2}$$

Bezwzględna niepewność złożona

$$u_c(Z_x) = \frac{u_{c,rel}(Z_x)}{100\%} \cdot Z_x = \sqrt{\left(\frac{kl_V \cdot U_{nV}}{\sqrt{3} \cdot U_V}\right)^2 + \left(\frac{kl_A \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A}\right)^2} \cdot \frac{Z_x}{100\%}$$

12

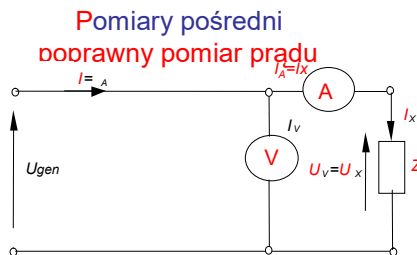
2.Pomiar impedancji RLC metodą techniczną 1

Metoda techniczna 1 :

metoda amperomierza – woltomierza pomiaru modułu impedancji polega na oddzielnych pomiarach

- Prądu I – amperomierzem A
- Napięcia U – woltomierzem

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x} \approx \frac{U_V}{I_A}$$



Błąd metodyczny (spowodowany ograniczoną rezystancją amperomierza $R_A \neq 0$, spadek napięcia na amperomierzu $U_A \neq 0$)

$$\delta_{met, R_A} = \frac{U_A}{U_x} \cdot 100\% \approx \frac{R_A}{Z_x} \cdot 100$$

$$Z_x \gg R_A$$

13

2.Pomiar impedancji RLC metodą techniczną 1

Dobór metody pośredniego pomiaru impedancji graniczną z minimalnym wpływem rezystancji wejściowej woltomierza i amperomierza jest w przybliżeniu podobny do wyboru metody podczas pomiaru rezystancji na paradye stałym:

- 1) Na podstawie znajomości rezystancji wejściowej woltomierza R_V oraz amperomierza R_A obliczmy tak zwaną wartość graniczną impedancji:

$$Z_{gr} \approx \sqrt{R_V R_A}$$

- 2) Znaną przybliżoną wartość impedancji Z_x (lub wyznaczoną ze wstępnego je pomiaru) porównujemy z wartością graniczną Z_{gr} :

Jeśli $Z_x > Z_{gr}$, wtedy wybieramy metodą poprawnego pomiaru prądu;
Jeśli $Z_x < Z_{gr}$, wtedy wybieramy metodą poprawnego pomiaru napięcia.

14

2. Pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Obliczenia:

$$Z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2}$$

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}$$

$$X_{Lx} = \omega L_x; X_{Cx} = \frac{1}{\omega C_x}$$

$$L_x = \frac{X_{Lx}}{\omega} = \frac{X_{Lx}}{2\pi f}; C_x = \frac{1}{\omega X_{Cx}} = \frac{1}{2\pi f X_{Cx}}$$

Z_x - moduł impedancji
 R_x - rezystancja
 X_x - sesupstancja (składowa urojona)

Metoda techniczna :
 Impedancja Z_x : prąd AC
 Amperomierz AC, woltomierz AC

Rezystancja R_x : prąd DC
 Amperomierz DC, woltomierz DC

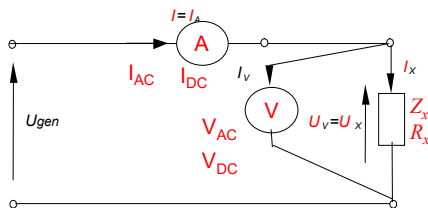
15

2. Pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Pomiary pośrednie

Pomiar impedancji na prądzie przemiennym: AC $Z_x = \frac{U_{x,AC}}{I_{x,AC}} \approx \frac{U_{V,AC}}{I_{A,AC}}$

or rezystancji na prądzie stałym: DC $R_{x,DC} = \frac{U_{x,DC}}{I_{x,DC}} \approx \frac{U_{V,DC}}{I_{A,DC}}$



$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_{x,DC}^2} \approx \sqrt{\frac{U_{V,AC}^2}{I_{A,AC}^2} - \frac{U_{V,DC}^2}{I_{A,DC}^2}}$$

$$L_x = \frac{X_{Lx}}{2\pi f}; C_x = \frac{1}{2\pi f \cdot X_{Cx}}$$

Do pomiaru częstotliwości f – miernik częstotliwości

16

3. Niepewność wyników pomiaru parametrów RLC metodą techniczną 1

Niepewność pomiaru parametrów RLC

Pomiar indukcyjności (pomiar rezystancji na prądzie stałym) :

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_{x,DC}^2}$$

$$L_x = \frac{X_x}{\omega} = \frac{X_x}{2\pi \cdot f} = \frac{\sqrt{Z_x^2 - R_{x,DC}^2}}{2\pi \cdot f}$$

Względna niepewność złożona

$$u_{c,rel}(L_x) = \sqrt{u_{B,rel}^2(f) + \frac{Z_x^4 \cdot u_{B,rel}^2(Z_x) + R_{x,DC}^4 \cdot u_{B,rel}^2(R_{x,DC})}{X_x^4}}$$

Względne niepewności pomiaru rezystancji oraz impedancji

$$u_{c,rel}(R_{x,DC}) = \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,DC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,DC})}; \quad u_{c,rel}(Z_x) = \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,AC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,AC})}$$

Względna niepewność pomiaru częstotliwości miernikiem analogowym

$$u_{B,rel}(f) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{kl_f \cdot f_n}{100\% \cdot f}$$

Bezwzględna niepewność złożona

$$u_c(L_x) = \frac{u_{c,rel}(L_x)}{100\%} \cdot L_x$$

17

3. Niepewność wyników pomiaru parametrów RLC metodą techniczną 1

Niepewność pomiaru parametrów RLC

Pomiar pojemności (pomiar rezystancji na prądzie stałym) :

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_{x,DC}^2}$$

$$C_x = \frac{1}{\omega X_{Cx}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_{Cx}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \sqrt{Z_x^2 - R_{x,DC}^2}}$$

Względna niepewność złożona

$$u_{c,rel}(C_x) = \sqrt{u_{B,rel}^2(f) + \frac{Z_x^4 \cdot u_{B,rel}^2(Z_x) + R_{x,DC}^4 \cdot u_{B,rel}^2(R_{x,DC})}{X_x^4}}$$

Względne niepewności pomiaru rezystancji oraz impedancji

$$u_{c,rel}(R_{x,DC}) = \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,DC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,DC})}; \quad u_{c,rel}(Z_x) = \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,AC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,AC})}$$

Względna niepewność pomiaru częstotliwości miernikiem analogowym

$$u_{B,rel}(f) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{kl_f \cdot f_n}{100\% \cdot f}$$

Bezwzględna niepewność złożona

$$u_c(C_x) = \frac{u_{c,rel}(C_x)}{100\%} \cdot C_x$$

18

3. Niepewność wyników pomiaru parametrów RLC metodą techniczną 1

Niepewności wskazań mierników na prądzie stałym (Pomiar rezystancji):
analogowych:

$$u_{B,rel}(U_{V,DC}) = \frac{kl_{V,DC} \cdot U_{nV,DC}}{\sqrt{3} \cdot U_{V,DC}}$$

$$u_{B,rel}(I_{A,DC}) = \frac{kl_{A,DC} \cdot I_{nA,DC}}{\sqrt{3} \cdot I_{A,DC}}$$

cyfrowych:

$$u_{B,rel}(U_{V,DC}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a_{V,DC} + b_{V,DC} \frac{U_{nV,DC}}{U_{V,DC}} \right) \quad u_B(I_{A,DC}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a_{A,DC} + b_{A,DC} \frac{I_{nA,DC}}{I_{A,DC}} \right)$$

Niepewności wskazań mierników na prądzie przemiennym (Pomiar impedancji):
analogowych:

$$u_{B,rel}(U_{V,AC}) = \frac{kl_{V,AC} \cdot U_{nV,AC}}{\sqrt{3} \cdot U_{V,AC}}; \quad u_{B,rel}(I_{A,AC}) = \frac{kl_{A,AC} \cdot I_{nA,AC}}{\sqrt{3} \cdot I_{A,AC}}$$

cyfrowych:

$$u_{B,rel}(U_{V,AC}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a_{V,AC} + b_{V,DC} \frac{U_{nV,AC}}{U_{V,AC}} \right); \quad u_{B,rel}(I_{A,AC}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a_{A,AC} + b_{A,DC} \frac{I_{nA,AC}}{I_{A,AC}} \right)$$

19

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 1. Pomiary impedancji: Podczas pomiaru impedancji obiektu indukcyjnego wskazanie woltomierza $U_V = 121$ V, wskazanie amperomierza $I_A = 3.45$ A, rezystancja (układ zastępczy szeregowy) $R_{ob} = 20.5 \Omega$, częstotliwość $f = 50$ Hz.

Wyznaczyć:

1. Impedancje obiektu Z_{ob} .
2. Indukcyjność obiektu L_{ob} .
3. Dobroć obiektu indukcyjnego Q_{ob} .

20

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 1.

Rozwiązanie:

1) Impedancja obiektu $Z_{ob} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{121 V}{3,45 A} \approx 35.072 \Omega$

2) Indukcyjność obciążenia: $L_{ob} = \frac{\sqrt{Z_{ob}^2 - R_{ob}^2}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{35.072^2 - 20.5^2} \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} \approx 90.58 \text{ mH}$

3) Dobroć obiektu: $Q_{ob} = \frac{2\pi f L_{ob}}{R_{ob}} = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 90.58 \text{ mH}}{20.5 \Omega} \approx 1.39$

21

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 2. Pomiary impedancji: Podczas pomiaru impedancji obiektu pojemnościowego wskazanie woltomierza $U_V=480 \text{ V}$, wskazanie amperomierza $I_A=0.435 \text{ A}$, rezystancja (układ zastępczy równoległy) $R_{ob}=12.5 \text{ k}\Omega$, częstotliwość $f=50 \text{ Hz}$.

Wyznaczyć:

1. Admitancę obiektu Y_{ob} .
2. Pojemność obiektu C_{ob} .
3. Stratność obiektu pojemnościowego $\text{tg}\delta$.

22

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 2.

Rozwiązanie:

1) Admitancja obiektu $Y_{ob} = \frac{I_A}{U_V} = \frac{0.435 A}{480 V} \approx 9.063 \cdot 10^{-3} S$

2) Pojemność obiektu

$$C_{ob} = \frac{\sqrt{Y_{ob}^2 - \frac{1}{R_{ob}^2}}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{(9.063 \cdot 10^{-4})^2 - \frac{1}{12500^2}}}{2\pi \cdot 50 Hz} \approx 2.874 \cdot 10^{-6} F = 2.874 \mu F$$

3) Stratność obiektu:

$$\operatorname{tg} \delta_p = \frac{1}{R_{ob} \cdot 2\pi f C_{ob}} = \frac{1}{12500 \Omega \cdot 2\pi 50 Hz \cdot 2.874 \cdot 10^{-6} F} \approx 0.089$$

23

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 3. Pomiary impedancji: Podczas pomiaru impedancji obiektu indukcyjnego wskazanie woltomierza $U_V=225 V$ (zakres 300 V, klasa dokładności 1.0), wskazanie amperomierza $I_A=3,45 A$ (zakres 5A, klasa 1.5)

Wyznaczyć:

- 1. Impedancje obiektu Z_{ob} .
- 2. Względne niepewności wskazań mierników.
- 3. Względna niepewność pomiaru impedancji obiektu.
- 4. Bezwzględna niepewność pomiaru impedancji obiektu.

24

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 3.

Rozwiązanie:

1) Impedancja obiektu $Z_{ob} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{225\text{ V}}{2,75\text{ A}} \approx 81,818\ \Omega$

2a) Względna niepewność pomiaru napięcia $u_{B,rel}(U) = \frac{kI_V U_{nV}}{\sqrt{3}U_V} = \frac{1,0 \cdot 300\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 225\text{ V}} \approx 0,770\%$

2b) Względna niepewność pomiaru prądu $u_{B,rel}(I) = \frac{kI_A I_{nA}}{\sqrt{3}I_A} = \frac{1,5 \cdot 3\text{ A}}{\sqrt{3} \cdot 2,75\text{ V}} \approx 0,945\%$

3) Względna złożona niepewność pomiaru impedancji

$$u_{c,rel}(Z) = \sqrt{u_{B,rel}^2(U) + u_{B,rel}^2(I)} = \sqrt{0,770^2 + 0,945^2} = 1,219\%$$

4) Bezwzględna złożona niepewność pomiaru impedancji

$$u_{c,rel}(Z) = \frac{u_{c,rel}(Z) \cdot Z_{ob}}{100\%} = \frac{1,219\% \cdot 81,818\ \Omega}{100\%} \approx 0,997\ \Omega \approx 1,0\ \Omega$$

25

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

- **Przykład 4. Pomiary impedancji:** Podczas pomiaru indukcyjności odbiornika jednofazowego wartość częstotliwości 50.0 Hz (względna niepewność standardowa 0.15%) wskazanie woltomierza $U_V=227.4\text{ V}$ (zakres 250 V, klasa dokładności 0.5), wskazanie amperomierza $I_A=4.457\text{ A}$ (zakres 5A, klasa 0.5). Rezystancja na prądzie stałym jest znana: $R_{ob}=25.45\ \Omega$ ze względną niepewnością standardową 0.25 %.

• Wyznaczyć:

1. Impedancje obiektu Z_{ob} .
2. Indukcyjność obiektu
3. Względną złożoną niepewność pomiaru impedancji.
4. Względna niepewność pomiaru indukcyjności obiektu.
5. Bezwzględna niepewność pomiaru indukcyjności obiektu₂₆

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 4.

Rozwiązanie:

1) Impedancja obiektu $Z_{ob} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{227.5 V}{4.457 A} \approx 51.043 \Omega$

2a) Reaktancja obiektu $X_{ob} = \sqrt{Z_{ob}^2 - R_{ob}^2} = \sqrt{51.043^2 - 25.45^2} \approx 44.246 \Omega$

2b) Indukcyjność obciążenia: $L_{ob} = \frac{X_{ob}}{2\pi f} = \frac{44.246}{2\pi \cdot 50} \approx 140.84 \text{ mH}$

27

4. Przykłady pomiar parametrów RLC metodą techniczną 1

Przykład 4.

Rozwiązanie:

3a) Względna niepewność pomiaru napięcia

$$u_{B,rel}(U) = \frac{kI_V U_{nV}}{\sqrt{3} U_V} = \frac{0.5 \cdot 250V}{\sqrt{3} 227.5V} \approx 0.317\%$$

3b) Względna niepewność pomiaru prądu

$$u_{B,rel}(I) = \frac{kI_A I_{nA}}{\sqrt{3} I_A} = \frac{0.5 \cdot 5A}{\sqrt{3} 4.457V} \approx 0.324\%$$

3c) Względna złożona niepewność pomiaru impedancji

$$u_{c,rel}(Z) = \sqrt{u_{B,rel}(U)^2 + u_{B,rel}(I)^2} = \sqrt{0.317^2 + 0.324^2} = 0.453\%$$

4) Względna złożona niepewność pomiaru indukcyjności

$$u_{c,rel}(L) = \sqrt{u_{B,rel}(f)^2 + \frac{Z_{ob}^4 u_{c,rel}(Z)^2 + R_{ob}^4 u_{c,rel}(DR)^2}{X^4}} = \sqrt{0.15^2 + \frac{51.043^4 \cdot 0.453^2 + 25.45^4 \cdot 0.25^2}{44.246^4}} = 0.627\%$$

5) Bezwzględna złożona niepewność pomiaru indukcyjności

$$u_{c,rel}(L) = \frac{u_{c,rel}(L) \cdot L_{ob}}{100\%} = \frac{0.627\% \cdot 140.84 \text{ mH}}{100\%} \approx 0.88 \text{ mH}$$

28

Pomiary impedancji Pomiary RLC Część II

29

1. Pomiar parametrów RLC metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

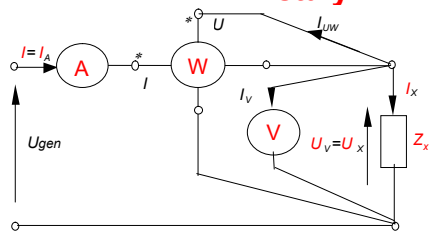
Metoda techniczna 2 bazuje na pomiarach watomierzem mocy czynnej oraz wartości skutecznych napięcia (woltomierzem AC) oraz prądu (amperomierzem AC).

Tj. metoda techniczna 2: pomiary na prądzie przemiennym:

- Mocy P – watomierzem W
- Prądu I – amperomierzem A
- Napięcia U – woltomierzem V

$$Z_x = \frac{U_V}{I_A}; \quad R_x = \frac{P}{I_A^2}, \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}$$

Ta metoda nie potrzebuje pomiaru rezystancji na prądzie stałym

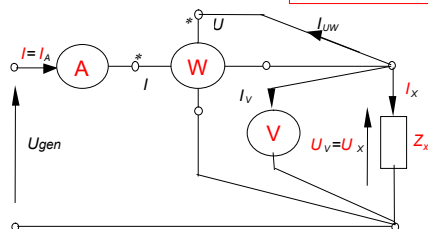


30

1. Pomiar parametrów RLC metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Z_x - moduł impedancji $Z_x = \frac{U_x}{I_x} \approx \frac{U_V}{I_A}$

R_x - rezystancja $R_x = \frac{P_x}{I_x^2} \approx \frac{P_W}{I_A^2}$ $R_x \cong \frac{U_V^2}{P_W}$



$S = U_V I_A$

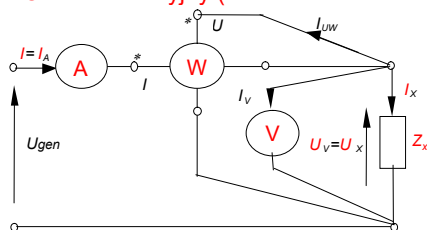
X_x - składowa

$$X_x = \frac{Q_x}{I_x^2} = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} \approx \sqrt{\left(\frac{U_V}{I_A}\right)^2 - \left(\frac{P_W}{I_A^2}\right)^2} = Z_x \sqrt{1 - \left(\frac{P_W}{U_V I_A}\right)^2} = Z_x \sqrt{1 - \left(\frac{P_W}{S}\right)^2}$$

31

1. Pomiar parametrów RLC metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Obiekt indukcyjny (wskazanie watomierza - „dodatnie”)



$$L_x = \frac{X_x}{\omega} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_V}{I_A} \sqrt{1 - \left(\frac{P_W}{U_V I_A}\right)^2}$$

Dobroć

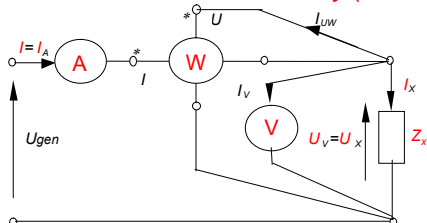
$Q_s = \frac{\omega L_{x,s}}{R} = \sqrt{\left(\frac{U_V I_A}{P_W}\right)^2 - 1}$ szeregowy

$Q_p = \frac{R}{\omega L_{x,p}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U_V I_A}{P_W}\right)^2 - 1}}$ równoległy

32

1. Pomiar parametrów RLC metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Obiekt pojemnościowy (wskazanie watomierza - „ujemne”)



stratność

$$C_X = \frac{1}{\omega X_X} \cong \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{I_A}{U_V \sqrt{1 - \left(\frac{P_W}{U_V I_A}\right)^2}}$$

$$D_{x,s} = \operatorname{tg} \delta_x = \omega R C_{x,s} \approx \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U_V I_A}{P_W}\right)^2 - 1}}$$

szeregowy

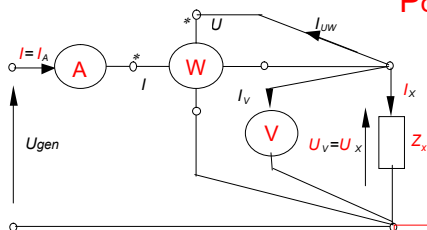
$$D_{x,p} = \operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega R C_{x,p}} \approx \sqrt{\left(\frac{U_V I_A}{P_W}\right)^2 - 1}$$

równoległy

33

2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Pomiar rezystancji:



$$R_x = \frac{P_x}{I_x^2} \approx \frac{P_W}{I_A^2}$$

$$P_x \rightarrow P_W$$

$$I_x \rightarrow I_A$$

Względna niepewność złożona

$$u_{c,rel}(R_x) = \sqrt{u_{rel}^2(P_W) + 4u_{rel}^2(I_A)} = \sqrt{\left(\frac{kl_W \cdot P_{nW}}{\sqrt{3} \cdot P_W}\right)^2 + 4\left(\frac{kl_A \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A}\right)^2}$$

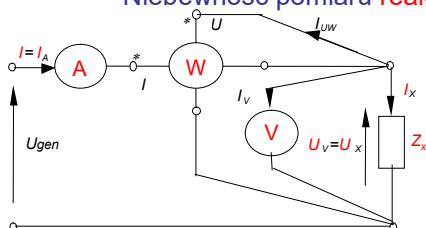
Bezwzględna niepewność złożona

$$u_c(R_x) = \frac{u_{c,rel}(R_x)}{100\%} \cdot R_x = \sqrt{\left(\frac{kl_W \cdot P_{nW}}{\sqrt{3} \cdot P_W}\right)^2 + 4\left(\frac{kl_A \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A}\right)^2} \cdot \frac{R_x}{100\%}$$

34

2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Niepewność pomiaru reakcji



$$I_x \rightarrow I_A, U_x \rightarrow U_V \quad P_x \rightarrow P_W; f \rightarrow Hz$$

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} \approx \sqrt{\frac{U_V^2}{I_A^2} - \frac{P_W^2}{I_A^4}}$$

Względna i bezwzględna standardowa niepewność złożona pomiaru reakcji

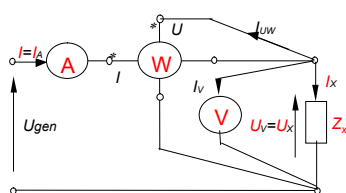
$$u_{c,rel}(X_x) = \sqrt{\left(\frac{Z_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}(U_V)^2 + \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}(P_W)^2 + \left(1 - \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^2\right)^2 u_{B,rel}(I_A)^2}$$

$$u_c(X_x) = \frac{X_x u_{c,rel}(X_x)}{100\%}$$

35

2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Niepewność pomiaru indukcyjności



$$I_x \rightarrow I_A, U_x \rightarrow U_V \quad P_x \rightarrow P_W; f \rightarrow Hz$$

$$L_x = \frac{X_x}{2\pi \cdot f} = \frac{\sqrt{Z_x^2 - R_x^2}}{2\pi \cdot f} \approx \frac{\sqrt{\frac{U_V^2}{I_A^2} - \frac{P_W^2}{I_A^4}}}{2\pi \cdot f}$$

Względna i bezwzględna standardowa niepewność złożona pomiaru indukcyjności

$$u_{c,rel}(L_x) = \sqrt{u_{c,rel}(X_x)^2 + u_{B,rel}(f)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{Z_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}(U_V)^2 + \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}(P_W)^2 + \left(1 - \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^2\right)^2 u_{B,rel}(I_A)^2 + u_{c,rel}(f)^2}$$

$$u_c(L_x) = \frac{L_x u_{c,rel}(L_x)}{100\%}$$

36

2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym : W, V, A

Niepewność pomiaru dobroci obiektu indukcyjnego (pomiar rezystancji na prądzie przemiennym):

$$Q_L = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \frac{X_x}{R_x} = \sqrt{\frac{Z_x^2}{R_x^2} - 1} = \sqrt{\frac{U_V^2 I_A^2}{P_W^2} - 1}$$

Bezwzględna niepewność złożona

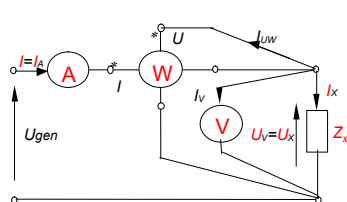
$$u_c(Q_L) = \frac{\frac{U_{V,AC}^2 I_{A,AC}^2}{P_W^2}}{\sqrt{\frac{U_{V,AC}^2 I_{A,AC}^2}{P_W^2} - 1}} \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,AC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,AC}) + u_{B,rel}^2(P_W)} =$$

$$= \left(Q_L + \frac{1}{Q_L} \right) \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,AC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,AC}) + u_{B,rel}^2(P_W)}$$

37

2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym: W, V, A

Niepewność pomiaru pojemności



$$I_x \rightarrow I_A, U_x \rightarrow U_V$$

$$P_x \rightarrow P_W; f \rightarrow Hz$$

$$C_x = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_x} = \frac{1}{2\pi \cdot f} = \frac{1}{2\pi \cdot f \sqrt{\frac{U_V^2}{I_A^2} - \frac{P_W^2}{I_A^4}}}$$

Względna i bezwzględna standardowa niepewność złożona pomiaru indukcyjności

$$u_{c,rel}(C_x) = \sqrt{u_{c,rel}^2(X_x) + u_{B,rel}^2(f)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{Z_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}^2(U_V) + \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}^2(P_W) + \left(1 - \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^2\right)^2 u_{B,rel}^2(I_A) + u_{c,rel}^2(f)}$$

$$u_c(C_x) = \frac{C_x u_{c,rel}(C_x)}{100\%}$$

38

2. Niepewność pomiaru metodą techniczną 2 na prądzie przemiennym : W, V, A

Niepewność pomiaru stratności obiektu pojemnościowego (pomiar rezystancji na prądzie przemiennym):

$$D_C = \omega \cdot R_x C_x = \frac{R_x}{X_x} = \frac{1}{\sqrt{\frac{U_V^2 I_A^2}{P_W^2} - 1}}$$

Bezwzględna niepewność złożona

$$u_c(D_C) = \frac{\frac{U_V^2 I_A^2}{P_W^2}}{\left(\frac{U_V^2 I_A^2}{P_W^2} - 1\right)^{\frac{3}{2}}} \sqrt{u_{B,rel}^2(U_V) + u_{B,rel}^2(I_A) + u_{B,rel}^2(P_W)} =$$

$$= D_C (1 + D_C^2) \sqrt{u_{B,rel}^2(U_{V,AC}) + u_{B,rel}^2(I_{A,AC}) + u_{B,rel}^2(P_W)}$$

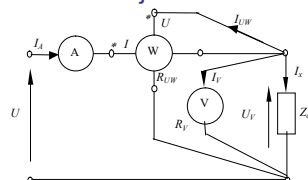
39

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 1. Pomiary składowych impedancji:

Podczas pomiaru impedancji odbiornika jednofazowego wskazania mierników: watomierza $n_W=83$ dz (zakresy napięciowy $U_{nW}=300$ V, prądowy $I_{nW}=5$ A; znamionowa liczba działek $n_{nW}=150$ dz, nominalny $\cos\varphi_{nW}=1$, klasa $kl_W=0.5$, wskazanie woltomierza $U_V=228,5$ V, zakres 250 V, klasa $kl_V=1.0$, wskazanie amperomierza $I_A=4.45$ A, zakres 10 A, klasa $kl_A=1.0$. Częstotliwość $f=50$ Hz. Według wskazania mierników wyznaczyć:

1. Impedancje obiektu Z_{ob} .
2. Rezystancję obiektu R_{ob} .
3. Reaktancje obiektu X_{ob} .
4. Względną złożoną standardową niepewność pomiaru impedancji
5. Względną złożoną standardową pomiaru rezystancji
6. Względną złożoną standardową pomiaru reaktancji



40

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 1. Pomiary składowych impedancji

Rozwiązanie:

Impedancja obiektu

$$Z_{ob} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{228.5 \text{ V}}{4.45 \text{ A}} = 51.348 \Omega$$

2a) Stała podziałki watomierza:

$$c_w = \frac{U_{nW} I_{nW} \cos \varphi_{nW}}{n_{nW}} = \frac{300 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot 1}{150 \text{ dz}} = 10 \text{ W / dz}$$

2b) Moc czynna (wskazanie watomierza)

$$P = P_w = c_w n_w = 10 \text{ W / dz} \cdot 83 \text{ dz} = 830 \text{ W}$$

2c) Rezystancja obiektu

$$R_{ob} = \frac{P}{I_A^2} = \frac{830 \text{ W}}{(4.45 \text{ A})^2} = 41.914 \Omega$$

3) Reaktancja obiektu

$$X_{ob} = \sqrt{Z_{ob}^2 - R_{ob}^2} = \sqrt{51.348^2 - 41.914^2} = 29.66 \Omega$$

41

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 1. Pomiary składowych impedancji. Rozwiązanie:

4a) Względna standardowa niepewność pomiaru napięcia

$$u_{B,rel}(U) = \frac{kl_V \cdot U_{nV}}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{1.0\% \cdot 250 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 228.5 \text{ V}} = 0.632\%$$

4b) Względna złożona standardowa niepewność pomiaru prądu

$$u_{B,rel}(I) = \frac{kl_A \cdot I_{nA}}{\sqrt{3} \cdot I_A} = \frac{1.0\% \cdot 5 \text{ A}}{\sqrt{3} \cdot 4.45 \text{ A}} = 0.649\%$$

4c) Względna złożona standardowa niepewność pomiaru impedancji

$$u_{c,rel}(Z) = \sqrt{u_{B,rel}^2(U) + u_{B,rel}^2(I)} = \sqrt{0.632^2 + 0.649^2} = 0.905\%$$

5a. Względna niepewność standardowa pomiaru mocy

$$u_{B,rel}(P) = \frac{kl_W \cdot n_{nW}}{\sqrt{3} \cdot n_W} = \frac{0.5\% \cdot 150}{\sqrt{3} \cdot 83} = 0.522\%$$

5b. Względna złożona standardowa niepewność pomiaru rezystancji

$$u_{c,rel}(R) = \sqrt{u_{B,rel}^2(P) + 4u_{B,rel}^2(I)} = \sqrt{0.522^2 + 4 \cdot 0.649^2} = 1.40\%$$

6. Względna złożona standardowa niepewność pomiaru reaktancji

$$u_{c,rel}(X_x) = \sqrt{\left(\frac{Z_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}^2(U_V) + \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^4 u_{B,rel}^2(P_W) + \left(1 - \left(\frac{R_x}{X_x}\right)^2\right)^2 u_{B,rel}^2(I_A)} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{51.348}{29.66}\right)^4 0.632^2 + \left(\frac{41.914}{29.66}\right)^4 0.522^2 + \left(1 - \left(\frac{41.914}{29.66}\right)^2\right)^2 0.649^2} = 1.85\%$$

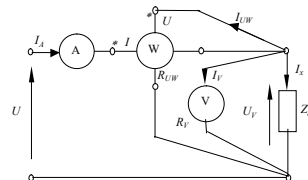
42

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 2. Pomiary impedanci, indukcyjności:

Podczas pomiaru impedancji odbiornika jednofazowego (indukcyjny) wskazania mierników: watomierza $n_W=83$ dz (zakresy napięciowy $U_{nW}=150$ V, prądowy $I_{nW}=5$ A; znamionowa liczba działek $n_{nW}=150$ dz, nominalny $\cos\varphi_{nW}=1$) wskazanie woltomierza $U_V=135.5$ V oraz którego wskazanie amperomierza $I_A=4.65$ A. Częstotliwość $f=50$ Hz. Według wskazania mierników watomierza i amperomierza) wyznaczyć:

1. Impedancje obiektu **Zob**.
2. Reaktancje obiektu **Xob**.
3. Indukcyjność obiektu **Lob**
4. Dobroć obiektu **Qob**



43

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 2. Pomiary impedanci, indukcyjności: Rozwiązanie:

1) Impedancja obiektu $Z_{ob} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{137.5 \text{ V}}{4.65 \text{ A}} = 29.570 \Omega$

2a) stała podziałki watomierza: $c_w = \frac{U_{nW} I_{nW} \cos\varphi_{nW}}{n_{nW}} = \frac{150 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot 1}{150 \text{ dz}} = 5 \text{ W / dz}$

2b) moc czynna (wskazanie watomierza) $P = P_W = c_w n_W = 5 \text{ W / dz} \cdot 83 \text{ dz} = 415 \text{ W}$

2c) Rezystancja obiektu $R_{ob} = \frac{P}{I_A^2} = \frac{415 \text{ W}}{(4.65 \text{ A})^2} = 19.193 \Omega$

2d) reaktancja obiektu $X_{ob} = \sqrt{Z_{ob}^2 - R_{ob}^2} = \sqrt{29.5708^2 - 19.193^2} = 22.495 \Omega$

3) Indukcyjność obiektu $L_{ob} = \frac{X_{ob}}{2\pi f} = \frac{22.495 \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} \approx 7.160 \cdot 10^{-2} \text{ H} = 71.60 \text{ mH}$

4) Dobroć obiektu $Q_{ob} = \frac{X_{ob}}{R_{ob}} = \frac{22.495 \Omega}{19.193 \Omega} \approx 1.17$

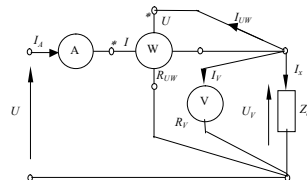
44

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 3. Pomiary impedancji, pojemności:

Podczas pomiaru impedancji odbiornika jednofazowego (pojemnościowy) wskazania mierników: watomierza $n_W=41$ dz (zakresy napięciowy $U_{nW}=300$ V, prądowy $I_{nW}=10$ A; znamionowa liczba działek $n_{nW}=150$ dz, nominalny $\cos\varphi_{nW}=1$) wskazanie woltomierza $U_V=232,5$ V oraz którego wskazanie amperomierza $I_A=8,95$ A. Częstotliwość $f=50$ Hz. Według wskazania mierników watomierza woltomierza i amperomierza) wyznaczyć:

- 1. Impedancje obiektu Z_{ob} .
- 2. Reaktancje obiektu X_{ob} .
- 3. Pojemność C_{ob} obiektu.
- 4. Stratność D_{ob} obiektu



45

3. Przykłady pomiaru metodą techniczną 2

Przykład 3. Pomiary impedancji pojemności: Rozwiązanie:

1) impedancja obiektu $Z_{ob} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{232,5 \text{ V}}{8,95 \text{ A}} = 25,978 \Omega$

2a) stała podziałki watomierza: $c_w = \frac{U_{nW} I_{nW} \cos\varphi_{nW}}{n_{nW}} = \frac{300 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} \cdot 1}{150 \text{ dz}} = 20 \text{ W / dz}$

2b) moc czynna (wskazanie watomierza)

$$P = P_W = c_w n_W = 20 \text{ W / dz} \cdot 41 \text{ dz} = 820 \text{ W}$$

2c) rezystancja obiektu $R_{ob} = \frac{P}{I_A^2} = \frac{820 \text{ W}}{(8,95 \text{ A})^2} = 10,237 \Omega$

2d) reaktancja obiektu $X_{ob} = \sqrt{Z_{ob}^2 - R_{ob}^2} = \sqrt{25,978^2 - 10,237^2} = 23,876 \Omega$

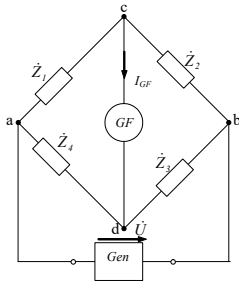
3) pojemność obiektu $C_{ob} = \frac{1}{2\pi f \cdot X_{ob}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 23,876 \Omega} \approx 1,333 \cdot 10^{-4} \text{ F} = 133,3 \mu\text{F}$

4) Stratność obiektu $D_{ob} = \frac{R_{ob}}{X_{ob}} = \frac{10,237 \Omega}{23,876 \Omega} \approx 0,43$

46

4. Pomiary RLC mostkami prądu przemiennego

Układ mostkowy prądu zmiennego utworzony jest połączeniem 4 impedancji (zespolone) Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 w obwód kołowy, zasilany **Generatorem (Gen)** napięcia przemiennego U_{gen} o częstotliwości f pomiędzy dwoma przeciwnymi węzłami oraz Włączonym pomiędzy dwoma innymi przeciwnymi węzłami **Galwanometrem fazoczułym (GF)**



Równowaga mostka (przy zerowym prądzie galwanometru $I_{GF}=0$) zapewniana jest przy spełnieniu warunków:

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4$$

$$Z_1 Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}$$

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$$

amplitudowa

fazowa

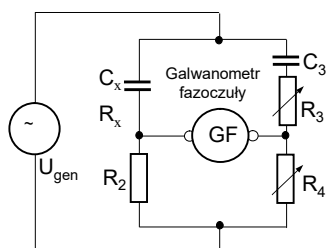
47

4. Pomiary RLC mostkami prądu przemiennego

Przykładowe układy mostkowe prądu zmiennego

Mostek Wien – Do pomiarów parametrów obiektu pojemnościowego.

Po zrównoważeniu mostku ($I_{GF}=0$)



$$C_x = \frac{R_4}{R_2} C_3$$

$$R_x = \frac{R_2}{R_4} R_3$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{Q_x} = \omega R_x C_x = \omega R_3 C_3 = \omega \tau_x$$

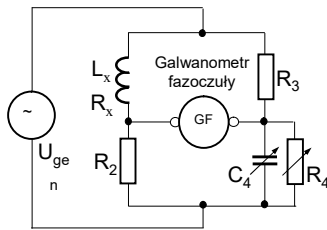
48

4. Pomiary RLC mostkami prądu przemiennego

Przykładowe układy mostkowe prądu zmiennego

Mostek Maxwell'a- Wiena – Do pomiaru parametrów obiektu indukcyjnego.

Po zrównoważeniu mostku: ($I_{GF}=0$)



$$L_x = R_2 R_3 C_4$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}$$

$$\tau_x = \frac{L_x}{R_x} = R_4 C_4$$

$$Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_4 C_4 = \omega \tau_x$$

49

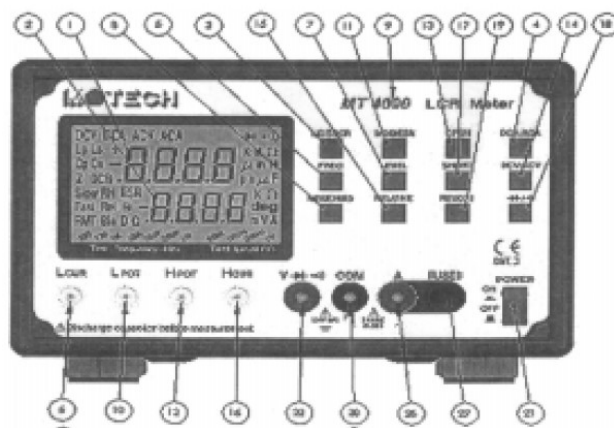
5. Elektroniczny mierniki impedancji LCR typu MT4090

- Miernik MT4090 LCR jest precyzyjnym przyrządem laboratoryjnym służącym do pomiarów impedancji i rezystancji cewek indukcyjnych, kondensatorów i rezystorów z podstawową dokładnością równą 0,1%.
- Dodatkowo, dzięki wbudowanym funkcjom pomiaru prądu i napięcia AC/DC oraz testów diod półprzewodnikowych i ciągłości MT4090 nie tylko służy do analizy charakterystyk podzespołów elektronicznych ale staje się podstawowym przyrządem na dowolnym stanowisku pomiarowym.

50

5. Elektroniczny mierniki impedancji LCR typu MT4090

- Widok panelu przedniego miernika impedancji LCR typu MT4090 [2] pokazany jest na rysunku.

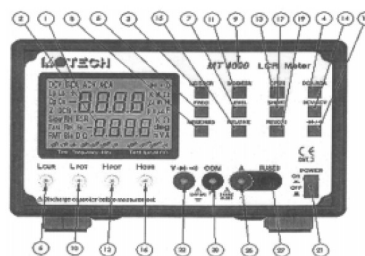


51

5. Elektroniczny mierniki impedancji LCR typu MT4090

Na tym rysunku podano następujące oznaczenia:

1. Podstawowe pole odczytowe
2. Dodatkowe pole odczytowe
3. Przycisk funkcji pomiarowej L/C/Z/DCR
4. Przycisk wyboru rodzaju prądu DCA/ACA
5. Przycisk wyboru częstotliwości testowej FREQ
6. Gniazdo pomiarowe LCUR
7. Przycisk wyboru napięcia testowego
8. Przycisk doboru zakresu RANGE HOLD
9. Oznaczenie modelu przyrządu
10. Gniazdo pomiarowe LPOT
11. Przycisk funkcji pomiarowej D/Q/θ/ESR
12. Gniazdo pomiarowe HPOT
13. Przycisk kalibracji rozwarciowej OPEN
14. Przycisk wyboru rodzaju napięcia DCV/ACV

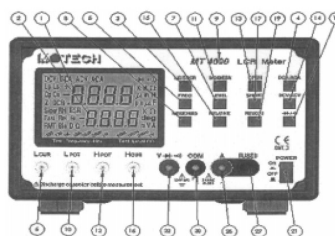


52

5. Elektroniczny mierniki impedancji LCR typu MT4090

Na tym rysunku podano następujące oznaczenia:

15. Przycisk funkcji pomiarów względnych RELATIVE
16. Gniazdo pomiarowe LCUR
17. Przycisk kalibracji zwarciowej SHORT
18. Przycisk wyboru testu diod lub ciągłości
19. Przycisk obsługi zdalnej REMOTE
20. Gniazdo pomiarowe COM (masa)
21. Włącznik zasilania POWER
22. Gniazdo pomiarowe multimetru V 24.
23. Gniazdo kabla sieciowego
24. Gniazdo interfejsu RS232C
25. Otwory wentylacyjne
26. Gniazdo pomiarowe prądowe A
27. Bezpiecznik topikowy 2A



53

5. Elektroniczny mierniki impedancji LCR typu MT4090

Pomiary RLC:

Parametry testowe:

1. **częstotliwość testowa** : 100Hz / 120Hz / 1kHz / 10kHz / 100kHz / 200kHz
 2. **napięcie testowe** : 1Vrms / 0,25Vrms / 50mVrms / 1VDC (tylko pomiar DCR)
- **mierzone wielkości** : Z, Ls, Lp, Cs, Cp, DCR, ESR, D, Q i θ
 - **dokładność podstawowa** : 0,1%
 - **wyświetlacz** : LCD, podwójny
 - **automatyczny i ręczny dobór zakresu pomiarowego**

54

5. Elektroniczny mierniki impedancji LCR typu MT4090

Pomiary RLC:

- interfejs RS-232
- kalibracja rozwarciowa i zwarciova
- wskaźniki podstawowego pola odczytowego:

Z : impedancja AC

DCR : rezystancja stałoprądowa

Ls : indukcyjność szeregową

Lp : indukcyjność równoległa

Cs : pojemność szeregową

Cp : pojemność równoległa

- Parametry wyświetlane na wyświetlaczu pomocniczym:

- θ : Kąt fazowy
- ESR : Równoważna rezystancja szeregową
- D :Stratność (tangens kąta strat)
- Q :Dobroć

55

6. Parametry metrologiczne miernika impedancji LCR typu MT4090

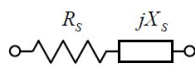
• Parametr	Zakres		
• Z	0,000 Ω	do	500,0 M Ω
• L	0,030 μ H	do	9999 H
• C	0,003 pF	do	80,00 mF
• DCR	0,000 Ω	do	500,0 M Ω
• ESR	0,000 Ω	do	9999 Ω
• D	0,000	do	9999
• Q	0,000	do	9999
• θ -	180,0°	do	180,0°
• Pomiary napięcia i prądu			
• V	0,0 mV	do	\pm 600 V
• A	0,000 mA	do	\pm 2 A

56

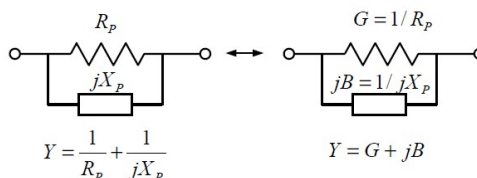
6. Parametry metrologiczne miernika impedancji LCR typu MT4090 4.

- Do celów analizy i pomiarów stosowane są dwa obwody zastępcze elementów impedancyjnych – szeregowy i równoległy.
- Na rysunku pokazano zależności między składowymi impedancji w obu trybach.

Szeregowy obwód zastępczy impedancji



Równoległy obwód zastępczy impedancji



57

6. Parametry metrologiczne miernika impedancji LCR typu MT4090

- **Pomiary pojemności:** Tabela 1-C

100Hz	79,57pF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	159,1μF	1,591μF	15,91μF	159,1μF
	159,1pF	1,591nF	15,91nF	159,1μF	1,591μF	15,91μF	159,1μF	1,591mF
	2% ±1	1% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1
120Hz	66,31pF	132,6pF	1,326nF	13,26nF	132,6μF	1,326μF	13,26μF	132,6μF
	132,6pF	1,326nF	13,26nF	132,6μF	1,326μF	13,26μF	132,6μF	13,26mF
	2% ±1	1% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1
1kHz	7,957pF	15,91pF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	159,1nF	1,591μF	159,1μF
	15,91pF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	159,1nF	1,591μF	159,1μF	1,591mF
	2% ±1	1% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1
10kHz	0,795pF	1,591pF	15,91nF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	159,1nF	1,591μF
	1,591pF	15,91pF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	159,1nF	1,591μF	159,1μF
	5% ±1	2% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1
100kHz	—	0,159pF	1,591pF	15,91pF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	1,591μF
	—	1,591pF	15,91pF	159,1pF	1,591nF	15,91nF	1,591μF	15,91μF
	—	5% ±1	2% ±1	1% ±1	0,4% ±1	1% ±1	2% ±1	5% ±1
200kHz	—	0,079pF	0,795pF	7,957pF	79,57pF	795,7pF	7,957nF	795,7nF
	—	0,795pF	7,957pF	79,57pF	795,7pF	7,957nF	795,7nF	7,957μF
	—	5% ±1	2% ±1	1% ±1	0,4% ±1	1% ±1	2% ±1	5% ±1

58

6. Parametry metrologiczne miernika impedancji LCR typu MT4090

• Pomiary indukcyjności Tabela 2-L

100Hz	31,83kH ±	15,91kH ±	1591H ±	159,1H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±
	15,91kH ±	1591H ±	159,1H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±
	2% ±1 ●	1% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1 ●	
120Hz	26,52kH ±	13,26kH ±	1326H ±	132,6H ±	13,26H ±	1,326H ±	132,6mH ±	13,26mH ±	1,326μH ±
	13,26kH ±	1326H ±	132,6H ±	13,26H ±	1,326H ±	132,6mH ±	13,26mH ±	1,326μH ±	
	2% ±1 ●	1% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1 ●	
1kHz	3,183kH ±	1,591kH ±	159,1H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±
	1,591kH ±	159,1H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±	
	2% ±1 ●	1% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1 ●	
10kHz	318,3H ±	159,1H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±	1,591μH ±
	159,1H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±	1,591μH ±	
	5% ±1 ●	2% ±1	0,5% ±1	0,2% ±1	0,1% ±1	0,2% ±1	0,5% ±1	1% ±1 ●	
100kHz	31,83H ±	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±	1,591μH ±	0,159μH ±
	15,91H ±	1,591H ±	159,1mH ±	15,91mH ±	1,591mH ±	159,1μH ±	1,591μH ±	0,159μH ±	
	—	5% ±1	2% ±1	1% ±1	0,4% ±1	1% ±1	2% ±1	5% ±1	
200kHz	15,91H ±	7,957H ±	795,7mH ±	79,57mH ±	7,957mH ±	795,7μH ±	79,57μH ±	0,795μH ±	0,079μH ±
	7,957H ±	795,7mH ±	79,57mH ±	7,957mH ±	795,7μH ±	79,57μH ±	0,795μH ±	0,079μH ±	
	—	5% ±1	2% ±1	1% ±1	0,4% ±1	1% ±1	2% ±1	5% ±1	

59

6. Parametry metrologiczne miernika impedancji LCR typu MT4090

• Pomiary współczynnika i kąta stratności Tabela 3-D

Dokładność pomiaru współczynnika stratności (D):

Często.	Zx 20M - 10M (Ω)	10M - 1M (Ω)	1M - 100k (Ω)	100k - 10k (Ω)	10k - 1k (Ω)	1k - 100 (Ω)	100 - 1 (Ω)	1 - 0,1 (Ω)
100Hz	± 0,020 ●	± 0,010	± 0,005	± 0,002	± 0,002	± 0,002	± 0,005	± 0,010 ●
120Hz								
1kHz								
10kHz	± 0,050 ●	± 0,020						
100kHz	—	± 0,050	± 0,020	± 0,010	± 0,004	± 0,010	± 0,020	± 0,050
200kHz								

Dokładność pomiaru kąta stratności (θ):

Często.	Zx 20M - 10M (Ω)	10M - 1M (Ω)	1M - 100k (Ω)	100k - 10k (Ω)	10k - 1k (Ω)	1k - 100 (Ω)	100 - 1 (Ω)	1 - 0,1 (Ω)
100Hz	± 1,046 ●	± 0,523	± 0,261	± 0,105	± 0,105	± 0,105	± 0,261	± 0,523 ●
120Hz								
1kHz								
10kHz	± 2,615 ●	± 1,046						
100kHz	—	± 2,615	± 1,046	± 0,409	± 0,209	± 0,409	± 1,046	± 2,615
200kHz								

60

7. Niepewność pomiaru LCR mostkiem typu MT4090

Niepewność standardowa wyników pomiaru mostkiem impedancji (**Z**), indukcyjności (**L**) oraz pojemności (**C**) wyznaczana jest według wzoru:

$$u_B(M) = \frac{\frac{WMBD \cdot M_x + c \cdot WCNZ}{100\%}}{\sqrt{3}}$$

- gdzie **WMBD** – względny maksymalny błąd dopuszczalny w procentach od wartości zmierzonej M_x (wskazanie miernika), a **c** – jest liczbą wartości cyfry najmniej znaczącej (**WCNZ**). Podane są w odpowiednich tabeli .
- Względna niepewność standardowa wyników pomiaru mostkiem) wyznaczana jest według wzoru:

$$u_{B,rel}(M) = \frac{WMBD + \frac{c \cdot WCNZ}{100\%} M_x}{\sqrt{3}}$$

61

7. Niepewność pomiaru LCR mostkiem typu MT4090

Niepewność pomiaru dobroci (**Q_x**) cewki

Ponieważ dobroć jest odwrotnością stratności $Q_x = \frac{1}{D_x}$

Dlatego niepewność pomiaru dobroci

$$u_B(Q) = \frac{u_B(D)}{D_x^2} = Q_x^2 u_B(D) = Q_x^2 \frac{MBD(D)}{\sqrt{3}}$$

gdzie **MBD(D_x)** jest maksymalnym błędem dopuszczalnym stratności dla zadanej częstotliwości oraz impedancji obiektu mierzonego.

62

7. Niepewność pomiaru LCR mostkiem typu MT4090

Niepewność standardowa wyników pomiaru mostkiem stratności (**Dx**) oraz dobroci (**Qx**).

Niepewność pomiaru stratności (**Dx**) kondensatora wyznaczana jest z **Tabeli 3-D** poprzez przeliczenie pojemności **Cx** w wartość impedancji na mierzonej częstotliwości, gdy zmierzona stratność (**Dx**) kondensatora jest **mniejsza lub równa 0.1**:

$$u_B(D) = \frac{MBD(Dx)}{\sqrt{3}}$$

gdzie **MBD(Dx)** jest **maksymalnym błędem dopuszczalnym stratności** dla zadanej częstotliwości oraz impedancji kondensatora.

Gdy spełniony jest warunek **Dx > 0.1**, należy wartość niepewności pomnożyć przez współczynnik **(1+Dx)**.

63

8. Pomiar mostkiem. Przykłady

- **Przykład 4.** Podczas pomiaru pojemności kondensatora na częstotliwości 200 kHz wskazanie miernika $M_x = C_x = 37.82 \text{ pF}$. Wyznaczyć:

- 1) bezwzględną niepewność wyniku pomiaru pojemności.
- 2) względną niepewność wyniku pomiaru pojemności.

- **Rozwiązanie:**

- 1) Według zadanej częstotliwości (200 kHz) oraz wyniku **37.82 pF** parametry niepewności znajdziemy w ostatnim wierszu oraz 4 kolumnie (zakres 7.957 pF ÷ 79.57 pF): **WMBD=±1%**, **c=1**. Tj.
- 2) Bezwzględna niepewność standardowa wyniku pomiaru pojemności:

$$u_B C = \frac{\frac{1\% \cdot 37.82 \text{ pF}}{100\%} + 1 \cdot 0.01 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 0.224 \text{ pF}$$

- 3) Względna niepewność standardowa wyniku pomiaru pojemności:

$$u_{B,rel}(C) = \frac{1\% + \frac{1 \cdot 0.01 \text{ pF}}{37.82 \text{ pF}} \cdot 100\%}{\sqrt{3}} = 0.593 \%$$

64

8. Pomiary mostkiem. Przykłady

- **Przykład 5.** Na częstotliwości 10 kHz mierzona pojemność, uzyskano wyniki: $C_x = 56.78 \text{ nF}$; stratność $D_x = 0.024$. Wyznaczyć:

- 1) bezwzględna niepewność standardową wyniku pomiaru stratności:

Rozwiązanie:

- 1) Impedancja kondensatora

$$Z_c = X_c = \frac{1}{2\pi f C_x} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 56.78 \cdot 10^{-9} \text{ F}} = 280.3 \Omega$$

- 2) Według tabeli 3-D dla $f=10 \text{ kHz}$ oraz $Z_c=280.3 \Omega$ z 6-jej kolumny i 2-go wiersza **$MBD(D_x)=\pm 0.002$** .

- 3) Bezwzględna niepewność standardową wyniku pomiaru stratności:

$$u_B(D_x) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.00115$$

65

8. Pomiary mostkiem. Przykłady

- **Przykład 6.** Podczas pomiaru indukcyjności na częstotliwości 1 kHz wskazanie miernika $M_x=L_x = 25.35 \text{ mH}$. Wyznaczyć:

- 1) bezwzględną niepewność wyniku pomiaru indukcyjności.
- 2) względną niepewność wyniku pomiaru indukcyjności.

Rozwiązanie:

- 1) Według zadanej częstotliwości (1 kHz) oraz wyniku (25.35 mH) parametry niepewności znajdziemy w 3-m wierszu oraz 7 kolumnie (zakres 15.91 mH ÷ 159.1 μH): **$WMBD=\pm 0.5\%$, $c=1$** . Tj.

- 2) Bezwzględna niepewność standardowa wyniku pomiaru indukcyjności:

$$u_B(L) = \frac{\frac{0.5\% \cdot 25.35 \text{ mH}}{100\%} + 1 \cdot 0.01 \text{ mH}}{\sqrt{3}} = 0.0790 \text{ mH}$$

- 3) Względna niepewność standardowa wyniku pomiaru indukcyjności:

$$u_{B,rel}(L) = \frac{0.5\% + \frac{1 \cdot 0.01 \text{ mH}}{25.35 \text{ mH}} \cdot 100\%}{\sqrt{3}} = 0.311\%$$

66

8. Pomiary mostkiem. Przykłady

Przykład 7. Na częstotliwości 1 kHz mierzona indukcyjność, uzyskano wyniki: $L_x = 122.3 \text{ mH}$; dobroć $Q_x = 30$. Wyznaczyć:

- 1) bezwzględna niepewność standardową wyniku pomiaru dobroci:

Rozwiązanie:

- 1) Impedancja indukcyjnościowa:

$$Z_L = X_L = 2\pi f L_x = 2\pi \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 122.3 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 768.4 \Omega$$

- 2) Według tabeli 3-D dla $f=1 \text{ kHz}$ oraz $Z_L=768.4 \Omega$ z 6-ej kolumny i 2-go wiersza $M\text{BD}(D_x)=\pm 0.002$.

- 3) Bezwzględna niepewność standardową wyniku pomiaru dobroci:

$$u_B(D_x) = 30^2 \frac{0.002}{\sqrt{3}} \approx 1.04$$