

**CPP-2022****Przykładowe zadania do kolokwium N3****Zadania teoretyczne:**

- 1) Podstawowe parametry obiektów RLC, w tym dobroć i stratność
- 2) Podstawowe układy zastępcze obiektów RLC, schematy i wzory
- 3) Zasada pomiaru parametrów obiektu indukcyjnego metodą detekcji synchronicznej, schematy, wyniki.
- 4) Zasada pomiaru parametrów obiektu pojemnościowego metodą detekcji synchronicznej: schemat, wyniki.
- 5) Zasada pomiaru parametrów obiektu indukcyjnego metodą dwóch częstotliwości, schemat, wyniki
- 6) Zasada pomiaru parametrów obiektu pojemnościowego metodą dwóch częstotliwości, schemat, wyniki
- 7) Uprozczone schematy wirtualnych mierników RLC metodą dwóch częstotliwości, schematy, wyniki.
- 8) Zasada pomiaru parametrów obiektu indukcyjnego metodą impedancyjną z wykorzystaniem cewki i rezystora referencyjnego (metoda przesuwu współrzędnych) : schemat, wyniki.
- 9) Zasada pomiaru parametrów obiektu pojemnościowego metodą impedancyjną z wykorzystaniem kondensatora i rezystora referencyjnego (metoda przesuwu współrzędnych) : schemat, wyniki.
- 10) Uprozczone schematy wirtualnych mierników RLC metodą przesuwu współrzędnych (z wykorzystaniem obiektów referencyjnych) : schemat, wyniki.
- 11) Zasada spektroskopii impedancyjnej.
- 12) Uproszczony schemat wirtualnego spektroskopu impedancji, schematy, wyniki.
- 13) Zasada wyznaczania zakresów pasm częstotliwości sygnałów w spektroskopie impedancyjnym.

**Zadania praktyczne**

**Przykład 1.** Wyznaczyć napięcia na wyjściach filtrów detektorów synchronicznych przy zadanych parametrach układu: Amplituda napięcia generatora  $U_{mg}=8V$ , częstotliwość napięcia generatora  $f_g=1$  kHz; Współczynnik układu mnożącego  $k_m=0.1/V$ ; rezystor referencyjny  $R_{ref}=250 \Omega$ .  
 Obiekt indukcyjny:  $L_x \approx 100$  mH,  $R_{Lx} \approx 20 \Omega$ .

**Rozwiązanie:**

1) Napięcie na wyjściu filtra detektora synchronicznego w kanale pomiaru  $L_x$ :

$$U_{Lx} = \frac{k_m U_{mg}^2}{\pi R_{ref}} 2\pi f_g L_x = 5.12V$$

2) Napięcie na wyjściu filtra detektora synchronicznego w kanale pomiaru  $R_{Lx}$ :

$$U_{RLx} = \frac{k_m U_{mg}^2}{\pi R_{ref}} R_x = 0.163V .$$

**Przykład 2.** Wyznaczyć napięcia ba wyjściach filtrów detektorów synchronicznych przy zadanych parametrach układu: Amplituda napięcia generatora  $U_{mg}=7V$ , częstotliwość napięcia generatora  $f_g=10$  kHz;  
 Współczynnik układu mnożącego  $k_m=0.1/V$ ; Rezystor referencyjny  $R_{ref}=1$  k $\Omega$ .  
 Obiekt pojemnościowy:  $C_x \approx 100$  nF,  $R_{Cx} \approx 10$  k $\Omega$

**Rozwiązanie:**

1) Napięcie na wyjściu filtra detektora synchronicznego w kanale pomiaru  $C_x$ :

$$U_{C_x} = \frac{k_m U_{mg}^2}{\pi} 2\pi f_g C_x \cdot R_{ref} = 9.80V$$

2) Napięcie na wyjściu filtra detektora synchronicznego w kanale pomiaru  $G_{C_x}$ :

$$U_{GL_x} = \frac{k_m U_{mg}^2}{\pi} \frac{R_{ref}}{R_{C_x}} = 0.1526V.$$

**Przykład 3.** Podczas pomiaru indukcyjności metodą 2-ch częstotliwości uzyskano wyniki: częstotliwości  $f_1=1.0004$  kHz,  $f_2=1.9995$  kHz, rezystor referencyjny:  $R_{ref}=10 \Omega$ . Wartości skuteczne napięć: **na obiekcie mierzonym:**  $U_{L_x,1}=6.894$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{L_x,2}=6.973$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ), **na rezystorze referencyjnym:**  $U_{R_{ref},1}=0.5416$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{R_{ref},2}=0.2766$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ),

**Wyznaczyć:**

- 1) Indukcyjność cewki;
- 2) Rezystancję cewki;
- 3) Dobroć cewki

**Rozwiązanie:**

1) Wartość indukcyjności:

$$L_x = \frac{R_{ref}}{2\pi} \sqrt{\frac{(U_{L_x,2}/U_{R_{ref},2})^2 - (U_{L_x,1}/U_{R_{ref},1})^2}{f_2^2 - f_1^2}} = 0.02004 H = 20.04mH$$

2) Wartość rezystancji:

$$R_{L_x} = R_{ref} \sqrt{\frac{(U_{L_x,1}/U_{R_{ref},1})^2 f_2^2 - (U_{L_x,2}/U_{R_{ref},2})^2 \cdot f_1^2}{f_2^2 - f_1^2}} = 19.795 \Omega$$

3) Dobroć cewki:

$$Q = \frac{2\pi f L_x}{R_x} \approx 6.35$$

**Przykład 4.** Podczas pomiaru indukcyjności metodą 2-ch częstotliwości uzyskano wyniki: częstotliwości  $f_1=1.0004$  kHz,  $f_2=1.9995$  kHz, MBD (maksymalny błąd dopuszczalny) częstotliwości generatora  $\delta f_{gen,gr}=\pm 0.01\%$ , rezystor referencyjny:  $R_{ref}=10 \Omega$ , wartości MBD rezystora referencyjnego  $\delta R_{ref,gr}=\pm 0.01\%$ . Wartości skuteczne napięć: **na obiekcie mierzonym:**  $U_{L_x,1}=6.894$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{L_x,2}=6.973$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ), (zakres  $U_{n1}=10V$ , MBD1:  $\pm 0.05\%$  od wskazania,  $\pm 0.05\%$  od zakresu), **na rezystorze referencyjnym:**  $U_{R_{ref},1}=0.5416$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{R_{ref},2}=0.2766$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ), (zakres  $U_{n2}=1V$ , MBD2:  $\pm 0.05\%$  od wskazania,  $\pm 0.05\%$  od zakresu)

Indukcyjność cewki  $L_x \approx 20.0$  mH

**Wyznaczyć:**

- 1) Względną złożoną niepewność standardową pomiaru indukcyjności,
- 2) Bezwzględną złożoną niepewność standardową pomiaru indukcyjności.

Wstępnie obliczamy wartość:

$$0) V_U = \left( \frac{U_{L_x,2}}{U_{R_{ref},2}} \right)^2 - \left( \frac{U_{L_x,1}}{U_{R_{ref},1}} \right)^2 = 473.3$$

- 1) Względną złożoną niepewność standardową pomiaru indukcyjności

$$u_{c,rel}(L_x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\delta_{Rref,gr}^2 + \frac{f_1^4 + f_2^4}{(f_2^2 - f_1^2)^2} \delta_{f_{gen,gr}}^2 + \frac{1}{V_U^2} \left( \frac{U_{Lx1}}{U_{Rref1}} \right)^4 \left[ (a_{u1} + b_{u1} \cdot U_{n1}/U_{Lx,1})^2 + (a_{u2} + b_{u2} \cdot U_{n2}/U_{Rref,1})^2 \right] + \frac{1}{V_U^2} \left( \frac{U_{Lx2}}{U_{Rref2}} \right)^4 \left[ (a_{u1} + b_{u1} \cdot U_{n1}/U_{Lx,2})^2 + (a_{u2} + b_{u2} \cdot U_{n2}/U_{Rref,2})^2 \right]}$$

= 0.084%.

2) Bezwzględna standardowa niepewność indukcyjności:

$$u_c(L_x) = \frac{L_x u_{c,rel}(L_x)}{100\%} = 0.017 \text{ mH}$$

**Przykład 5.** Podczas pomiaru pojemności (układ zastępczy szeregowy) metodą 2-ch częstotliwości uzyskano wyniki: Częstotliwość  $f_1=10.007$  kHz,  $f_2=19.992$  kHz, rezystor referencyjny:  $R_{ref}=1$  k $\Omega$ . Wartości skuteczne napięć: **na obiekcie mierzonym:**  $U_{Cx,1}=7.525$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{Cx,2}=6.935$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ), **na rezystorze referencyjnym:**  $U_{Rref,1}=2.945$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{Rref,2}=3.222$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ).

**Wyznaczyć:**

- 1) Pojemność kondensatora;
- 2) Konduktancję kondensatora;
- 3) Stratność kondensatora na częstotliwości  $f_1$ ;

**Rozwiązanie:**

1) Wartość pojemności (dla układu szeregowego) poprzez pomiary impedancji:

$$C_x = \frac{1}{R_{ref} \cdot 2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}}{\left(\frac{U_{Cx,1}}{U_{Rref,1}}\right)^2 - \left(\frac{U_{Cx,2}}{U_{Rref,2}}\right)^2}} \approx 0.0100 \mu F = 10.0 \text{ nF}$$

2) Wartość rezystancji szeregowej kondensatora:

$$R_{Cx} = R_{ref} \sqrt{\frac{\left(\frac{U_{Cx,2}}{U_{Rref,2}}\right)^2 - \left(\frac{U_{Cx,1}}{U_{Rref,1}}\right)^2 \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2}} \approx 2.00 \text{ k}\Omega$$

3) Stratność kondensatora:

$$\text{tg} \delta = \frac{G_x}{2\pi f C_x} = \frac{1}{2\pi f R_{Cx} C_x} \approx 0.80$$

**Przykład 6.** Podczas pomiaru pojemności (układ zastępczy szeregowy) metodą 2-ch częstotliwości uzyskano wyniki: Częstotliwość  $f_1=10.007$  kHz,  $f_2=19.992$  kHz, MBD częstotliwości generatora  $\delta f_{gen,gr}=\pm 0.01\%$ ?, rezystor referencyjny:  $R_{ref}=1$  k $\Omega$ , wartości MBD rezystora referencyjnego  $\delta_{Rref,gr}=\pm 0.01\%$ . Wartości skuteczne napięć: **na obiekcie mierzonym:**  $U_{Cx,1}=7.525$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{Cx,2}=6.935$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ), (zakres  $U_{n1}=10$ V, MBD1:  $\pm 0.025\%$  od wskazania,  $\pm 0.025\%$  od zakresu), **na rezystorze referencyjnym:**  $U_{Rref,1}=2.945$  Vrms (częstotliwość  $f_1$ ),  $U_{Rref,2}=3.222$  Vrms (częstotliwość  $f_2$ ), (zakres  $U_{n2}=10$ V, MBD2:  $\pm 0.025\%$  od wskazania,  $\pm 0.025\%$  od zakresu)

Pojemność kondensatora 10.0 nF

**Wyznaczyć:**

- 1) Względną złożoną niepewność standardową pomiaru pojemności (w układzie szeregowym),
- 2) Bezwzględną złożoną niepewność standardową pomiaru pojemności.

Wstępnie obliczamy wartość:

$$V_U = \frac{U_{Cx,1}^2}{U_{Rref,1}^2} - \frac{U_{Cx,2}^2}{U_{Rref,2}^2} = 1.896$$

- 1) Względną złożoną niepewność standardową pomiaru pojemności,

$$u_{c,rel}(C_x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\delta_{Rref,gr}^2 + \frac{f_1^4 + f_2^4}{(f_2^2 - f_1^2)^2} \delta_{fgen,gr}^2 + \frac{1}{V_U^2} \left( \frac{U_{Cx,1}}{U_{Rref,1}} \right)^4 \left[ (a_{u1} + b_{u1} \cdot U_{n1}/U_{Cx,1})^2 + (a_{u2} + b_{u2} \cdot U_{n2}/U_{Rref,1})^2 \right] + \frac{1}{V_U^2} \left( \frac{U_{Cx,2}}{U_{Rref,2}} \right)^4 \left[ (a_{u1} + b_{u1} \cdot U_{n1}/U_{Cx,2})^2 + (a_{u2} + b_{u2} \cdot U_{n2}/U_{Rref,2})^2 \right]}$$

= 0.299%.

- 2) Bezwzględna standardowa niepewność indukcyjności:

$$u_c(C_x) = \frac{u_{c,rel}(C_x)}{100\%} C_x = \frac{0.299\%}{100\%} 10 \text{ nF} = 0.030 \text{ nF}$$

**Przykład 7.** Podczas pomiaru indukcyjności metodą impedancyjną na jednej częstotliwości (z cewką i rezystorem referencyjnym) uzyskano wyniki: Częstotliwość  $f=1.0004$  kHz, cewka referencyjna  $L_{ref}=10$  mH; rezystor referencyjny:  $R_{ref}=100 \Omega$ , rezystor wzorcowy (do pośredniego pomiaru prądu)  $R_n=100 \Omega$ . Wartości skuteczne napięć: **Na obiekcie mierzonym:** 1)  $U_{Lx,1}=U_{x,1}=6.913$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,1}=5.109$  Vrms, 2) **na szeregowym połączeniu cewek badanej i referencyjnej:**  $U_{LxLref,2}=U_{x,2}=8.097$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,2}=4.150$  Vrms, 3) **na szeregowym połączeniu cewki badanej i rezystora referencyjnego:**  $U_{LxRref,3}=U_{x,3}=6.973$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,3}=3.574$  Vrms.

**Wyznaczyć:**

- 1) Indukcyjność cewki;
- 2) Rezystancję cewki;
- 3) Dobroć cewki;

**Rozwiązanie:**

- 1) Wartość indukcyjności cewki badanej:

Wstępnie obliczmy reaktancję cewki referencyjnej:

$$X_{ref} = 2\pi \cdot f \cdot L_{ref} = 62.863 \Omega$$

$$L_x = L_{ref} \cdot \frac{\frac{R_n^2}{X_{Lref}^2} \left[ \left( \frac{U_{x,2}}{U_{Rn,2}} \right)^2 - \left( \frac{U_{x,1}}{U_{Rn,1}} \right)^2 \right] - 1}{2} \approx 0.0200 \text{ H} = 20.0 \text{ mH}$$

- 2) Wartość rezystancji cewki:

$$R_x = R_{ref} \cdot \frac{\frac{R_n^2}{R_{ref}^2} \left[ \left( \frac{U_{x,3}}{U_{Rn,3}} \right)^2 - \left( \frac{U_{x,1}}{U_{Rn,1}} \right)^2 \right] - 1}{2} \approx 50.00 \Omega$$

- 3) Wartość dobroci cewki:

$$Q = \frac{2\pi f L_x}{R_x} \approx 2.51$$

**Przykład 8.** Podczas pomiaru indukcyjności metodą impedancyjną na jednej częstotliwości (z cewką i rezystorem referencyjnym) uzyskano wyniki: Częstotliwość  $f=1.0004$  kHz, MBD częstotliwości generatora  $\delta f_{\text{gen,gr}}=\pm 0.01\%$ , cewka referencyjna  $L_{\text{ref}}=10$  mH, MBD cewki referencyjnej  $\delta L_{\text{ref,gr}}=\pm 0.05\%$ ; rezystor referencyjny:  $R_{\text{ref}}=100 \Omega$ , MBD rezystora referencyjnego  $\delta R_{\text{ref,gr}}=\pm 0.05\%$ , rezystor wzorcowy (do pośredniego pomiaru prądu)  $R_n=100 \Omega$ , MBD rezystora wzorcowego  $\delta R_{n,gr}=\pm 0.02\%$ . Wartości skuteczne napięć: **Na obiekcie mierzonym:** 1)  $U_{Lx,1}=U_{x,1}=6.913$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,1}=5.109$  Vrms, 2) **na szeregowym połączeniu cewek badanej i referencyjnej:**  $U_{LxLref,2}=U_{x,2}=8.097$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,2}=4.150$  Vrms, 3) **na szeregowym połączeniu cewki badanej i rezystora referencyjnego:**  $U_{LxRref,3}=U_{x,3}=6.973$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,3}=3.574$  Vrms.

Podczas wszystkich pomiarów zakres miernika napięcia  $U_n=10$  V, MBD:  $\pm 0.05\%$  od wskazania,  $\pm 0.05\%$  od zakresu.

Wartość indukcyjności cewki badanej 20.0 mH

#### Rozwiązanie:

1) Względna standardowa niepewność indukcyjności:

Wstępnie obliczamy wartości:

$$V_U = \left( \frac{U_{x,2}}{U_{Rn,2}} \right)^2 - \left( \frac{U_{x,1}}{U_{Rn,1}} \right)^2 = 1.976, \quad R_{nU}^2 = R_n^2 \cdot V_U - (X_{Lref})^2 = 15.807 \cdot 10^3$$

$$u_{c,rel}(L_x) = \frac{R_n^2}{\sqrt{3} \cdot R_{nU}^2} \sqrt{\begin{aligned} & (2V_U)^2 \delta_{Rn,gr}^2 + (V_U + (X_{Lref}/R_n)^2) \delta_{Lref,gr}^2 + (2V_U)^2 \delta_{fgen,gr}^2 + \\ & \left( \frac{U_{x,2}}{U_{Rn,2}} \right)^4 \left[ (a_u + b_u \cdot U_n/U_{x,2})^2 + (a_u + b_u \cdot U_n/U_{Rn,2})^2 \right] + \\ & \left( \frac{U_{x,1}}{U_{Rn,1}} \right)^4 \left[ (a_u + b_u \cdot U_n/U_{x,1})^2 + (a_u + b_u \cdot U_n/U_{Rn,1})^2 \right] \end{aligned}} \approx 0.378\%$$

2) Bezwzględna standardowa niepewność indukcyjności:

$$u_c(L_x) = \frac{L_x u_{c,rel}(L_x)}{100\%} = 0.076 \text{ mH}$$

#### Przykład 9.

Podczas pomiaru pojemności metodą impedancyjną na jednej częstotliwości (z kondensatorem i rezystorem referencyjnym) uzyskano wyniki: Częstotliwość  $f=10.007$  kHz, kondensator referencyjny  $C_{\text{ref}}=100$  nF (przewodność kondensatora referencyjnego  $G_{\text{Cref}}=10^{-5}$  S); rezystor referencyjny:  $R_{\text{ref}}=100 \Omega$ , rezystor wzorcowy (do pośredniego pomiaru prądu)  $R_n=100 \Omega$ . Wartości skuteczne napięć: **Na obiekcie mierzonym:** 1)  $U_{Cx,1}=U_{x,1}=7.087$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,1}=6.689$  Vrms, 2) **na równoległym połączeniu kondensatorów badanego i referencyjnego:**  $U_{CxRref,2}=U_{x,2}=5.291$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,2}=8.316$  Vrms, 3) **na równoległym połączeniu kondensatora badanego i rezystora referencyjnego:**  $U_{CxRref,3}=U_{x,3}=7.003$  Vrms, **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,3}=6.619$  Vrms.

Wyznaczyć:

- 1) Pojemność kondensatora;
- 2) Konduktancję kondensatora;
- 3) Stratność kondensatora na częstotliwości  $f$ ;

#### Rozwiązanie:

1) Wartość pojemności:

2) Wstępnie obliczmy susceptancję kondensatora referencyjnego:

$$B_{ref} = 2\pi \cdot f \cdot C_{ref} = 6.284 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$C_x = C_{ref} \cdot \frac{\frac{1}{R_n^2 B_{Cref}^2} \left[ \left( \frac{U_{Rn,2}}{U_{x,2}} \right)^2 - \left( \frac{U_{Rn,1}}{U_{x,1}} \right)^2 \right] - 1}{2} \approx 150.01 \text{ nF}$$

2) Wartość przewodności kondensatora:

$$G_x = \frac{1}{R_{ref}} \cdot \frac{\frac{R_{ref}^2}{R_n^2} \left[ \left( \frac{U_{Rn,3}}{U_{x,3}} \right)^2 - \left( \frac{U_{Rn,1}}{U_{x,1}} \right)^2 \right] - 1}{2} \approx 0.50 \text{ mS}$$

3) Stratność kondensatora:

$$\text{tg} \delta = \frac{G_x}{2\pi f C_x} \approx 0.80$$

### Przykład 10.

Podczas pomiaru pojemności metodą impedancyjną na jednej częstotliwości (z kondensatorem i rezystorem referencyjnym) uzyskano wyniki: Częstotliwość  $f=10.007 \text{ kHz}$ , MBD częstotliwości generatora  $\delta f_{gen,gr}=\pm 0.01\%$ , kondensator referencyjny  $C_{ref}=100 \text{ nF}$  (przewodność kondensatora referencyjnego  $G_{Cref}=10^{-5} \text{ S}$ ), MBD kondensatora referencyjnego  $\delta_{Cref,gr}=\pm 0.05\%$ ; rezystor referencyjny:  $R_{ref}=100 \Omega$ , MBD rezystora referencyjnego  $\delta_{Rref,gr}=\pm 0.05\%$ , rezystor wzorcowy (do pośredniego pomiaru prądu)  $R_n=100 \Omega$ , MBD rezystora wzorcowego  $\delta_{Rn,gr}=\pm 0.02\%$ . Wartości skuteczne napięć: **Na obiekcie mierzonym:** 1)  $U_{Cx,1}=U_{x,1}=7.087 \text{ Vrms}$ , **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,1}=6.689 \text{ Vrms}$ , 2) **na równoległym połączeniu kondensatorów badanego i referencyjnego:**  $U_{Cx,2}=U_{x,2}=5.291 \text{ Vrms}$ , **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,2}=8.316 \text{ Vrms}$ , 3) **na równoległym połączeniu kondensatora badanego i rezystora referencyjnego:**  $U_{Cx,3}=U_{x,3}=7.003 \text{ Vrms}$ , **na rezystorze wzorcowym:**  $U_{Rn,3}=6.619 \text{ Vrms}$ .

Podczas wszystkich pomiarów zakres miernika napięcia  $U_n=10 \text{ V}$ , MBD:  $a_u=\pm 0.05\%$  od wskazania,  $b_u=\pm 0.05\%$  od zakresu.

Wartość pojemności  $C=150.0 \text{ nF}$

Wyznaczyć:

- 1) Względna standardowa niepewność pojemności:
- 2) Bezwzględna standardowa niepewność pojemności:

### Rozwiązanie:

Wstępnie obliczmy wartości:

$$V_U = \left( \frac{U_{Rn,2}}{U_{x,2}} \right)^2 - \left( \frac{U_{Rn,1}}{U_{x,1}} \right)^2 = 1.579,$$

$$G_{nU}^2 = \frac{V_U}{R_n^2} - (B_{Cref})^2 = 11.85 \cdot 10^{-3} \text{ S}.$$

- 1) Względna standardowa niepewność pojemności:

$$u_{c,rel}(C_x) = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot R_n^2 G_{nU}^2} \sqrt{(2V_U)^2 \delta_{Rn,gr}^2 + (V_U + (B_{Cref} R_n)^2) \delta_{Cref,gr}^2 + (2V_U)^2 \delta_{fgen,gr}^2 + \left( \frac{U_{Rn,2}}{U_{x,2}} \right)^4 \left[ (a_u + b_u \cdot U_n / U_{x,2})^2 + (a_u + b_u \cdot U_n / U_{Rn,2})^2 \right] + \left( \frac{U_{Rn,1}}{U_{x,1}} \right)^4 \left[ (a_u + b_u \cdot U_n / U_{x,1})^2 + (a_u + b_u \cdot U_n / U_{Rn,1})^2 \right]} \approx 0.143\%.$$

2) Bezwzględna standardowa niepewność pojemności:

$$u_c(C_x) = \frac{u_{c,rel}(C_x)}{100\%} C_x = 0.214 \text{ nF}$$

**Przykład 11.** Zadano pasmo częstotliwości spektroskopu impedancji od  $f_{\min}=20$  Hz do  $f_{\max}=20$  kHz oraz dla odtworzenia przebiegu sinusoidalnego zastosowano  $m=40$  próbek na okres.

**Wyznaczyć:**

- 1) Liczbę (całkowitą) podzakresów analizatora oraz
- 2) Rzeczywiste wartości częstotliwości podzakresów.

1) Liczba podzakresów:

$$k \geq \left[ \frac{\log(f_{\max}/f_{\min})}{\log(0.8 \cdot m)} \right] \approx 2$$

2) Częstotliwości podzakresów:

Pierwsze pasmo ma szerokość:

$$\text{od } f_{\min}=20 \text{ Hz do } 0.8 \cdot m \cdot f_{\min} \text{ Hz}=640 \text{ Hz}$$

Drugie pasmo ma szerokość:

$$\text{od } 640 \text{ Hz do } (0.8 \cdot m)^2 \cdot f_{\min} = 20.48 \text{ kHz}$$