

Ćwiczenie F1

(90 minut)

Filtry pasywne

Przed zapoznaniem się z instrukcją i przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy opanować następujący materiał teoretyczny:

1. Bierne elementy elektroniczne. [1], [2].
2. Dzielnik napięcia. [1].
3. Obwody RC, LC i RLC. [3], [4], [5].

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest:

1. Wykonanie i analiza charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej i fazowo-częstotliwościowej filtru dolnoprzepustowego RC.
2. Wykonanie i analiza charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej i fazowo-częstotliwościowej filtru Wiena RC.

Wstęp

Filtrem częstotliwości nazywamy układ o strukturze czwórnika (czwórnik to układ mający cztery zaciski - jedna z par zacisków pełni rolę wejścia, zaś druga wyjścia), który przepuszcza bez tłumienia lub z małym tłumieniem napięcia i prądy w określonym paśmie częstotliwości, a tłumia napięcia i prądy leżące poza tym pasmem. Filtry częstotliwości mają głównie zastosowanie w urządzeniach elektronicznych i energetycznych. Umieszczone pomiędzy źródłem sygnału a odbiornikiem powodują, że do odbiornika dostaje się sygnał o pożądanym widmie częstotliwości, co oznacza, że z sygnału dostarczanego przez źródło został wyeliminowany sygnał o częstotliwości mieszczącej się w paśmie tłumienia.

Pasma częstotliwości, które filtr przepuszcza bez tłumienia (lub z małym tłumieniem) nosi nazwę pasma przepustowego, zaś pasmo, w którym napięcia i prądy podlegają silnemu tłumieniu nosi nazwę pasma tłumienia. Częstotliwość, która stanowi granicę pomiędzy pasmem przepustowym a pasmem tłumienia, nazywana jest częstotliwością graniczną. Filtr może mieć kilka częstotliwości granicznych. W zależności od położenia pasma przepustowego wyróżnia się następujące filtry:

- 1) dolnoprzepustowe - pasmo przepustowe od częstotliwości $f=0$ Hz do częstotliwości granicznej f_g ,
- 2) górnoprzepustowe - pasmo przepustowe od częstotliwości granicznej f_g do nieskończoności,
- 3) środkowoprzepustowe (pasmowe) - pasmo przepustowe od częstotliwości granicznej f_{g1} do częstotliwości granicznej f_{g2} ,
- 4) środkowozaporowe (zaporowe) - pasmo tłumienia od częstotliwości granicznej f_{g1} do częstotliwości granicznej f_{g2} .

W zależności od elementów wykorzystanych do budowy wyróżnia się grupy filtrów:

- 1) filtry pasywne - zbudowane z samych elementów pasywnych:
 - a) filtry bezindukcyjne (R,C) - zbudowane z rezystorów i kondensatorów,
 - b) filtry reaktancyjne (L,C) - zbudowane z cewek i kondensatorów,
- 2) filtry aktywne - w przypadku wykorzystania w układzie filtru elementów aktywnych takich jak np. wzmacniacze operacyjne. Dzięki temu istnieje możliwość zaprojektowania filtru o dowolnej charakterystyce częstotliwościowej.

Podstawowe parametry charakteryzujące pasywny filtr częstotliwości to:

- 1) współczynnik tłumienia filtru
- wyrażony w neperach

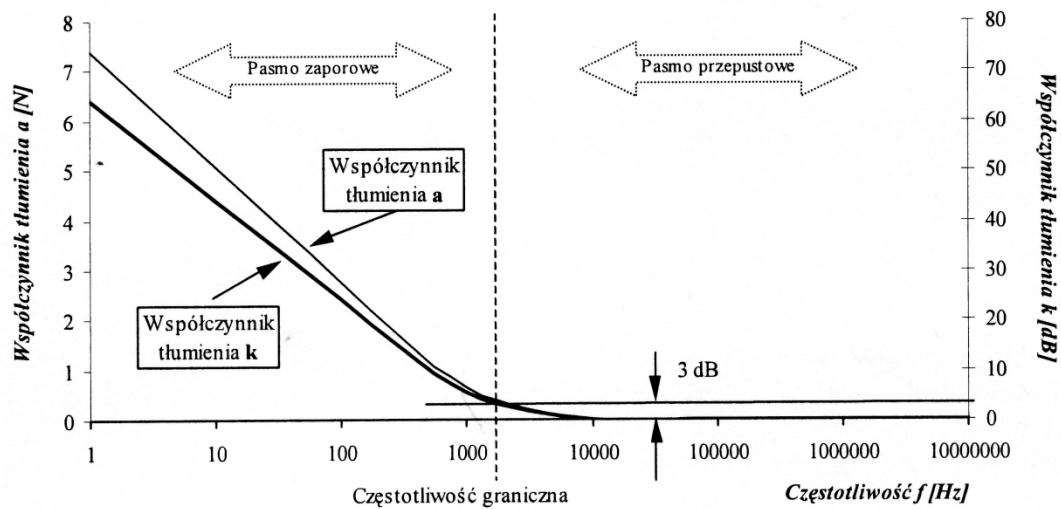
$$a = -\ln \frac{U_{wy}}{U_{we}} [N], \quad (1)$$

- wyrażony w decybelach

$$k = -20 \lg \left| \frac{U_{wy}}{U_{we}} \right| \text{ [dB]}, \quad (2)$$

- 2) współczynnik przesunięcia fazowego φ ,
- 3) częstotliwość graniczna (f_g),
- 4) impedancja falowa.

Współczynnik tłumienia (a lub k) - wielkość określająca, jaka część sygnału wejściowego znajdzie się przy określonej częstotliwości na wyjściu filtru. Może on być określany na kilka sposobów: jako bezpośredni stosunek wartości napięć lub prądów, w neperach (1) lub decybelach (2).



Rys.1. Logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe współczynnika tłumienia filtra górnoprzepustowego prezentowane w neperach (a) i decybelach (k)

Współczynnik przesunięcia fazowego φ - wyrażany w radianach lub stopniach kąta przesunięcia fazowego (wprzedzenia lub opóźnienia) pomiędzy napięciem na wejściu a napięciem na wyjściu filtru.

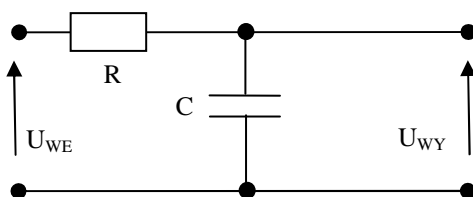
Częstotliwość graniczna (f_g) - wartość częstotliwości oddzielająca pasmo przepustowe od pasma zaporowego.

W fazie projektowania filtru jest ona określana na podstawie wartości zastosowanych w filtrze elementów oraz impedancji źródła i odbiornika. Może być również określana w oparciu o częstotliwościową charakterystykę współczynnika tłumienia lub częstotliwościową charakterystykę współczynnika przesunięcia fazowego.

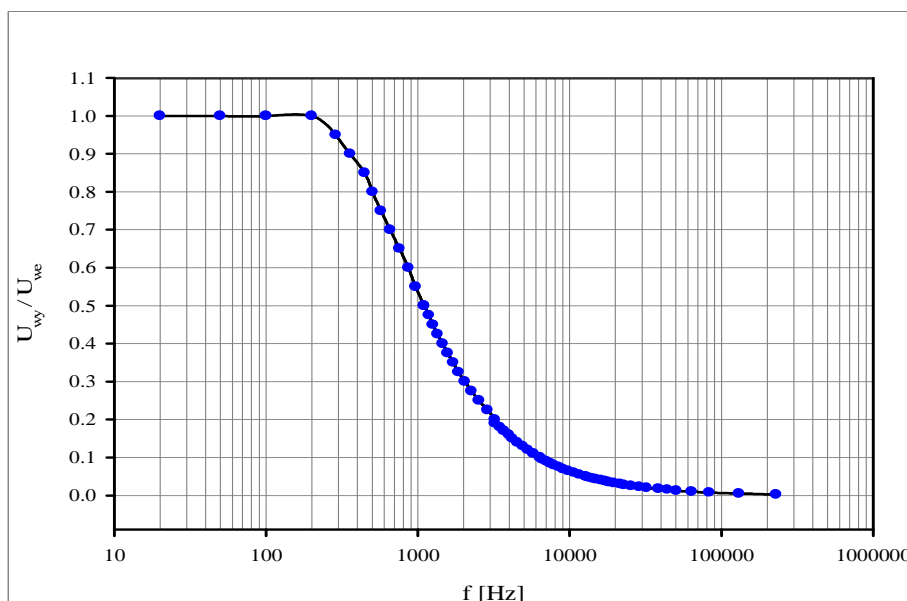
W przypadku określania częstotliwości granicznej na podstawie częstotliwościowej charakterystyki współczynnika tłumienia Rys.1, za częstotliwość graniczną można przyjmować taką wartość częstotliwości, przy której tłumienie zwiększa się o 3 dB w stosunku do wartości, jaką posiada w paśmie przepustowym (tzw. „3 decybelowa częstotliwość graniczna”).

Impedancja falowa – jest to taka impedancja odbiornika dołączonego do wyjścia filtru, przy której impedancja mierzona na wejściu jest równa impedancji odbiornika.

Filtr dolnoprzepustowy (układ całkujący)



Rys.2. Schemat prostego filtra dolnoprzepustowego RC.



Rys.3. Przykładowa charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa filtra dolnoprzepustowego RC dla położenia przełącznika w panelu pomiarowym w pozycji P1.

Analizując przedstawiony czwórnik (RC) dla przebiegów sinusoidalnie zmiennych napięcie wyjściowe U_{wy}^* możemy zapisać następująco

$$U_{wy}^* = \frac{X_c}{R + X_c} U_{we}^* \quad (3)$$

gdzie X_c - reaktancja pojemnościowa, U_{wy}^* i U_{we}^* są zespolonymi wartościami:

$$X_c = \frac{1}{i\omega C} \quad (4)$$

gdzie

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

a i oznacza liczbę urojoną ($i = \sqrt{-1}$).

Iloraz wartości amplitudy napięcia wyjściowego do wartości amplitudy napięcia na wejściu czwornika można wyrazić od częstotliwości w następującej postaci

$$\frac{U_{wy}^*}{U_{we}^*} = \frac{1}{1 + i2\pi fRC} \quad (6)$$

Ponieważ zależność (6) jest wielkością zespoloną, zatem korzystnie będzie analizować osobno jej część rzeczywistą i urojoną. Część rzeczywista wyrażenia (6) nosi nazwę charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej, a część urojona nosi nazwę charakterystyki fazowo-częstotliwościowej. Charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową możemy opisać zależnością:

$$\left| \frac{U_{wy}^*}{U_{we}^*} \right| = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} \quad (7)$$

Jeżeli przyjmiemy, że

$$2\pi f_g = \frac{1}{RC} \quad (8)$$

i podstawiając (8) do (7) otrzymamy

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_g}\right)^2}} \quad (9)$$

Wyrażenie (9) często zapisuje się w postaci logarymicznej, co odpowiada definicji współczynnika tłumienia k wyrażonego w decybelach.

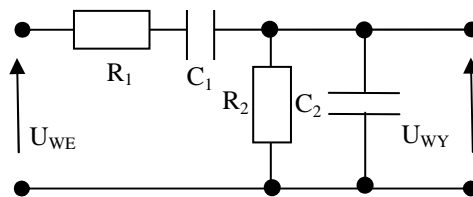
$$-20 \lg \frac{U_{wy}}{U_{we}} = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{f}{f_g}\right)^2 \right], \quad (10)$$

Charakterystykę fazowo-częstotliwościową tego filtra można opisać wyrażeniem

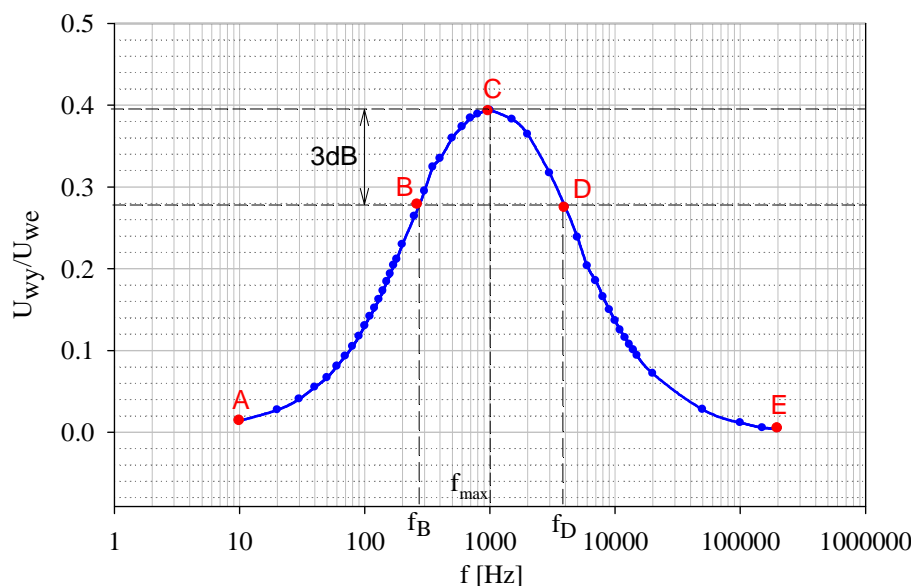
$$\varphi = -\arctg(2\pi fRC), \quad (12)$$

Filtr pasmowo przepustowy

Łącząc filtr górnoprzepustowy i dolnoprzepustowy otrzymuje się filtr pasmowoprzepustowy. Przykładem takiego filtra jest filtr Wienera, schemat tego filtra przedstawiono na Rys.4.



Rys.4. Schemat filtra Wienera RC.



Rys.5. Przykładowa charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa filtra Wienera RC dla położenia przełącznika w panelu pomiarowym w pozycji P1.

Analizując przedstawiony czwórnik (RC) dla przebiegów sinusoidalnie zmiennych iloraz wartości amplitudy napięcia wyjściowego do wartości amplitudy napięcia na wejściu czwornika można wyrazić od częstotliwości w następującej postaci

$$\frac{U_{wy}^*}{U_{we}^*} = \frac{i2\pi fRC}{1 + 6i\pi fRC - (2\pi fRC)^2} \quad (18)$$

Ponieważ zależność (18) jest wielkością zespoloną, zatem korzystnie będzie analizować osobno jej część rzeczywistą i urojoną podobnie jak dla wyrażenia (6).

$$\left| \frac{U_{wy}^*}{U_{we}^*} \right| = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{1}{\sqrt{9 + \left[\frac{1 - (2\pi fRC)^2}{2\pi fRC} \right]^2}} = \frac{1}{\sqrt{9 + \left[\frac{1 - \left(\frac{f}{f_{max}} \right)^2}{\frac{f}{f_{max}}} \right]^2}} \quad (19)$$

oraz

$$\varphi = \arctg \frac{1 - \left(\frac{f}{f_g} \right)^2}{3 \frac{f}{f_g}} \quad (20)$$

Dla częstotliwości rezonansowej moduł wyrażenia transmitancji (19) jest największy i równy $\frac{1}{3}$, a przesunięcie fazowe jest równe zero w przypadku idealnego filtra.

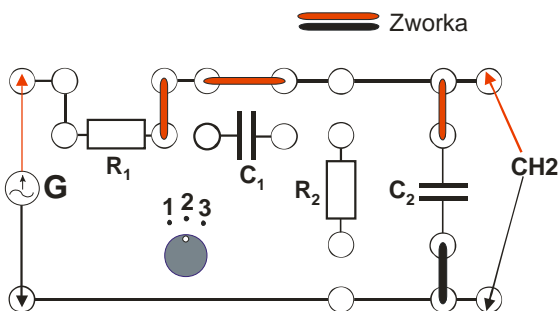
Metoda pomiaru

Metoda pomiaru charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych i fazowo-częstotliwościowych filtrów RC i LC oraz obwodów RLC oparta jest na pomiarze amplitudy napięcia na wejściu i wyjściu dzielnika napięcia.

Przebieg pomiaru

Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa i fazowo-częstotliwościowa filtru dolnoprzepustowego RC

1. Wykorzystując omomierz multimetru wykonać pomiary rezystancji oporników na panelu pomiarowym, dla wszystkich położań przełącznika Pł.1. Wyznaczyć błąd pomiaru rezystancji.
2. Za pośrednictwem trójnika BNC połączyć jednocześnie generator (G) z wejściem dzielnika napięcia RC jak na Rys.6 i z kanałem CH1 oscyloskopu. Oscyloskop połączyć z generatorem przewodem BNC-BNC, zaś układ pomiarowy przewodem BNC-wtyki bananowe.
3. Wyjście układu pomiarowego (dzielnika napięcia RC) połączyć z kanałem CH2 oscyloskopu jak na Rys.6.
4. Wybrać tryb pracy generatora – napięcie sinusoidalne. Oscyloskop ustawić do pracy z kanałem CH1 i CH2 (tryb DUAL).
5. Amplitudę sygnału na wyjściu z generatora ustawić na 0,4V.
6. Przełącznik Pł. 1 na panelu pomiarowym ustawić według zaleceń prowadzącego ćwiczenia.
7. Wykonać charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową badanego filtru dla przedziału częstotliwości $10\text{Hz} \div 1\text{MHz}$.
8. Otrzymane wyniki zapisać w formacie numer1, jednocześnie nanosząc otrzymane punkty pomiarowe na wykres.

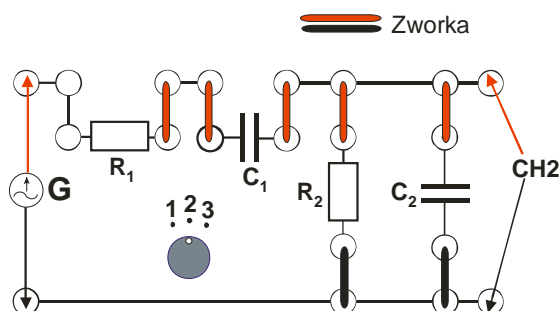


Rys.6. Schemat połączeń dla wyznaczenia charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej filtru dolnoprzepustowego.

Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa i fazowo-częstotliwościowa filtru Wienera RC

1. Za pośrednictwem trójnika BNC połączyć jednocześnie generator (G) z wejściem dzielnika napięcia RC jak na Rys.7 i z kanałem CH1 oscyloskopu. Oscyloskop połączyć z generatorem przewodem BNC-BNC, zaś układ pomiarowy przewodem BNC-wtyki bananowe.
2. Wyjście układu pomiarowego (dzielnika napięcia RC) połączyć z kanałem CH2 oscyloskopu jak na Rys.7.
3. Wybrać tryb pracy generatora – napięcie sinusoidalne. Oscyloskop ustawić do pracy z kanałem CH1 i CH2 (tryb DUAL).
4. Amplitudę sygnału na wyjściu z generatora ustawić na 0,4V.
5. Przełącznik Pł. 1 na panelu pomiarowym ustawić według zaleceń prowadzącego ćwiczenia.
6. Wykonać charakterystykę amplitudową badanego filtru dla przedziału częstotliwości $10\text{Hz} \div 1\text{MHz}$.

7. Otrzymane wyniki zapisać w formacie numer 2, jednocześnie nanosząc otrzymane punkty pomiarowe na wykres.



Rys.7. Schemat połączeń dla wyznaczenia charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej filtra Wiena RC.

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Stronę tytułową (wg wzoru).
2. Sformułowanie celu ćwiczenia.
3. Schematy układów pomiarowych.
4. Wykaz aparatury (nr inwentarzowy, typ, wykorzystywane nastawy i zakresy).
5. Stabelaryzowane wyniki pomiarów.
6. Wykresy i analizę wyników.
7. Uwagi końcowe i wnioski.

Wstęp do sprawozdania powinien zawierać definicje podstawowych pojęć występujących w sprawozdaniu. W celu łatwiejszego i jednoznacznego odwoływania się do wzorów występujących we wstępie jak i w dalszej części sprawozdania wszystkie z nich powinny być opatrzone numerami porządkowymi. W sprawozdaniu należy umieścić schematy tylko takich układów, które były rzeczywiście zestawiane w trakcie wykonywania pomiarów. Każdy schemat powinien być opatrzone numerem kolejnym i zatytułowany. Wszystkie elementy pokazane na schemacie muszą być jednoznacznie opisane i oznaczone za pomocą powszechnie stosowanej symboliki. W wykazie aparatury należy jednoznacznie opisać używaną aparaturę pomiarową poprzez podanie numeru inwentarzowego, typu itd. Nadane poszczególnym przyrządom oznaczenia należy konsekwentnie stosować na wszystkich schematach i w opisach. Jako wyniki pomiarów należy zamieścić tabele ze zmierzonymi wartościami. Każda tabela powinna posiadać swój numer kolejny i tytuł. Wszystkie wykresy wykonane na podstawie przeprowadzonych pomiarów powinny mieć numery porządkowe oraz podpisy zawierające informację o tym co dany wykres przedstawia.

Wykorzystując dane pomiarowe należy:

1. Wykreślić zależności $U_{wy}/U_{we}(f)$ i $k(f)$ dla badanych filtrów: dolnoprzepustowego RC i Wiena.
2. Odczytać z wykresu częstotliwość graniczną f_g dla której spełniony jest warunek $\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ co odpowiada tzw. 3 decybelowej częstotliwości granicznej oraz oszacować jej błąd Δf_g .
3. Dla filtra dolnoprzepustowego RC, obliczyć teoretyczną częstotliwość graniczną $f_g = \frac{1}{2\pi RC}$, wykorzystując podane pojemność wykorzystane w panelach pomiarowych.
4. Porównać ze sobą otrzymane wyniki z punktów 2 i 3.
5. Obliczyć dobroć układu Q dla filtra Wiena RC. Dobroć układu możemy obliczyć wykorzystując otrzymaną charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową: $Q = \frac{f_{max}}{f_D - f_B}$, gdzie $f_D - f_B$ odpowiada przedziałowi częstotliwości, dla którego tłumienie nie jest większe niż 3dB (zakres częstotliwości odpowiadający przedziałowi dla punktów B i D na Rys.5.).

Literatura

- [1] R. Śledziwski – *Elektronika dla Fizyków*, PWN, W-wa, 1984.

- [2] T. Stacewicz, A. Kotlicki – *Elektronika w laboratorium naukowym*, PWN, W-wa, 1994.
 [3] R. Resnick, D. Halliday – *Fizyka*, tom II, PWN, W-wa, 1998.
 [4] A. Hennel, W. Szuszkiewicz – *Zadania i problemy z Fizyki*, tom II, PWN, W-wa, 1993.
 [5] A. Januszajtis – *Fizyka dla Politechnik – Fale*, tom III, PWN, W-wa, 1991.

Tabela 1. Pojemności C użyte w panelach pomiarowym zmierzone mostkiem RLC Escort ELC-133A.

Panel pomiarowy F1-01					
Pojemność	100 Hz	1000 Hz	10000 Hz	Pozycja przełącznika	Typ filtru
C ₁ [nF]	211,7	211,1	209,4	P ₁	RC
C ₁ [nF]	444,9	440,4	438,7	P ₂	
C ₁ [nF]	1001,7	1000,1	997,6	P ₃	
C ₂ [nF]	219,0	218,4	219,8	P ₁	
C ₂ [nF]	468,1	466,7	463,7	P ₂	
C ₂ [nF]	1001,5	999,4	997,6	P ₃	
C ₁ [nF]	220,2	219,5	218,5	P ₁	LC
C ₁ [nF]	465,6	463,8	460,6	P ₂	
C ₁ [nF]	958,7	955,2	943,3	P ₃	
C ₂ [nF]	1003,2	999,1	968,1	P ₁	
C ₂ [nF]	466,8	465,1	461,2	P ₂	
C ₂ [nF]	215,8	215,3	213,6	P ₃	
Panel pomiarowy F1-02					
Pojemność	100 Hz	1000 Hz	10000 Hz	Pozycja przełącznika	Typ filtru
C ₁ [nF]	211,6	211,0	210,6	P ₁	RC
C ₁ [nF]	463,0	461,5	458,7	P ₂	
C ₁ [nF]	960,4	958,0	956,6	P ₃	
C ₂ [nF]	219,8	219,7	218,2	P ₁	
C ₂ [nF]	464,2	462,7	459,9	P ₂	
C ₂ [nF]	975,1	973,2	472,0	P ₃	
C ₁ [nF]	217,1	216,3	214,7	P ₁	LC
C ₁ [nF]	472,6	470,9	466,8	P ₂	
C ₁ [nF]	983,1	979,8	964,5	P ₃	
C ₂ [nF]	978,6	975,3	963,3	P ₁	
C ₂ [nF]	468,6	459,3	459	P ₂	
C ₂ [nF]	214,9	214,3	212,8	P ₃	
Panel pomiarowy F1-03					
Pojemność	100 Hz	1000 Hz	10000 Hz	Pozycja przełącznika	Typ filtru
C ₁ [nF]	213,7	212,9	211,4	P ₁	RC
C ₁ [nF]	458,4	456,7	453,9	P ₂	
C ₁ [nF]	952,8	951,5	950,3	P ₃	
C ₂ [nF]	213,6	212,4	211,0	P ₁	
C ₂ [nF]	470,9	472,4	468,2	P ₂	
C ₂ [nF]	973,2	971,0	971,2	P ₃	
C ₁ [nF]	216,3	215,4	213,9	P ₁	LC
C ₁ [nF]	466,7	464,8	460,9	P ₂	
C ₁ [nF]	1055,6	1051,7	1016,6	P ₃	
C ₂ [nF]	997,4	994,0	970,0	P ₁	
C ₂ [nF]	453,5	451,9	448,5	P ₂	
C ₂ [nF]	223,4	222,7	221,2	P ₃	
Panel pomiarowy F1-04					
Pojemność	100 Hz	1000 Hz	10000 Hz	Pozycja przełącznika	Typ filtru
C ₁ [nF]	218,3	217,8	216,4	P ₁	

C_1 [nF]	465,3	463,7	461,1	P_2	RC
C_1 [nF]	962,6	959,9	958,8	P_3	
C_2 [nF]	209,0	208,4	206,8	P_1	
C_2 [nF]	453,8	452,3	449,7	P_2	
C_2 [nF]	997,4	994,8	994,4	P_3	
C_1 [nF]	223,5	222,7	221,1	P_1	LC
C_1 [nF]	468,2	466,5	462,2	P_2	
C_1 [nF]	1020,6	1016,4	1002,1	P_3	
C_2 [nF]	957,8	954,2	935,6	P_1	
C_2 [nF]	474,3	472,7	469,1	P_2	
C_2 [nF]	216,1	215,4	214,1	P_3	

