

WZMACNIACZ POMIAROWY

1. Wstęp

W ćwiczeniu badany jest wzmacniacz pomiarowy zbudowany z elementów dyskretnych. Wzmacniacz służy do wzmacniania sygnału wytwarzanego przez scalony przetwornik ciśnienia typu MPX2010 firmy Motorola. Przetwornik ciśnienia zbudowany jest z rezystorów piezoelektrycznych. Ich rezystancja zależy od naprężeń, wywołanych przyłożoną siłą, powstającą w wyniku działania ciśnienia. Rezystory przetwornika połączone są w układzie mostka rezystancyjnego Wheatstone'a.

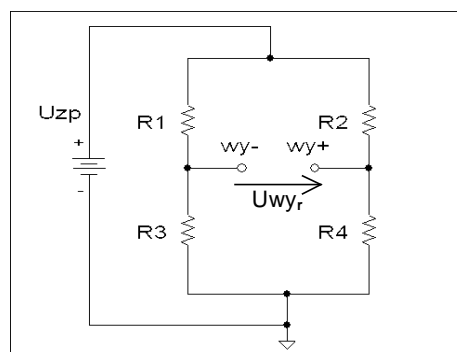
Ćwiczenie umożliwia pomiar następujących parametrów:

1. Charakterystyka statyczna wzmacniacza pomiarowego $U_{wy} = f(U_{we_r})$,
2. Wzmocnienie różnicowe K_{u_r} ,
3. Wzmocnienie sumacyjne K_{u_s} ,
4. Współczynnik tłumienia składowej wspólnej CMRR,
5. Charakterystyka przetwarzania scalonego przetwornika ciśnienia $U_{wy_{MPX2010}} = f_{MPX2010}(P)$
6. Charakterystyka przetwarzania układu pomiarowego, czyli zależność zmian napięcia wyjściowego U_{wy} wzmacniacza od wywieranego na przetwornik ciśnienia P gazu: $U_{wy} = f_p(P)$.

Ciśnienie P jest wytwarzane przy pomocy pompki. Wartość wytworzonego ciśnienia określona jest przez wysokość słupa wody (manometr hydrostatyczny).

2. Wzmacniacz pomiarowy

Wzmacniacze pomiarowe służą głównie do wzmacniania sygnałów wytwarzanych przez różnego rodzaju czujniki i przetworniki wielkości fizycznych. Typowym ich zastosowaniem jest wzmacnianie napięcia U_{wy_r} , powstającego na przekątnej mostka rezystancyjnego - rys.1. Mostek składa się z rezystorów $R_1 - R_4$, których wartość zależy od mierzonej wielkości. Przy pomiarach np. temperatury, przynajmniej jeden z rezystorów mostka jest termistorem. W czujnikach ciśnienia wszystkie rezystory mogą zmieniać wartość, wówczas wartość R_1 i R_4 wzrasta o Δr a R_2 i R_3 maleje o Δr . Istnieją czujniki, w których zmienia się tylko jeden z rezystorów. W użytym w ćwiczeniu czujniku MPX2010 zmianie ulegają wszystkie rezystory.



Rys. 1 Rezystancyjny mostek pomiarowy (tzw. mostek Wheatstonea)

Cechą mostka jest występowanie na obu jego wyjściach wy_+ i wy_- napięć stałych U_{wy_+} i U_{wy_-} o zbliżonych wartościach. Ich średnią arytmetyczną U_{wy_s} nazywamy sumacyjnym napięciem wyjściowym mostka (lub inaczej - składową wspólną napięć wyjściowych):

$$U_{wy_s} = \frac{(U_{wy_-} + U_{wy_+})}{2} \quad (2.1)$$

Ponieważ napięcia wyjściowe na ogół różnią się bardzo niewiele (poziom mV), stąd też $U_{wy_s} \approx U_{wy_-} \approx U_{wy_+}$.

Użytecznym sygnałem wyjściowym mostka jest różnica napięć wyjściowych U_{wy_r} . Jest to tzw. różnicowe napięcie wyjściowe U_{wy_r} (tzw. składowa różnicowa):

$$U_{wy_r} = (U_{wy_+} - U_{wy_-}) \quad (2.2)$$

Na podstawie rys. 1 napięcie wyjściowe U_{wy_r} jest określone zależnością:

$$U_{wy_r} = U_{z_p} \cdot \left(\frac{R_4}{R_4 + R_2} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) = U_{z_p} \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_2 + R_4)(R_1 + R_3)} \quad (2.3)$$

W stanie tzw. **równowagi** mostka $U_{wy_r} = 0$ stąd: $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$.

W użytym w ćwiczeniu czujniku ciśnienia, pod wpływem wywieranego ciśnienia P , wszystkie rezystory $R_1 - R_4$ zmieniają swoją wartość, przy czym rezystancje R_1 i R_4 wzrastają o $\Delta r(P)$, a R_2 i R_3 maleją o $\Delta r(P)$. Zmianę różnicowego napięcia wyjściowego mostka można określić z zależności:

$$\Delta U_{wy_r}(P) = U_{wy}(P) - U_{wy}(P=0) = U_{wy}(P) = \left(\frac{\Delta r(P)}{R_4 + R_2} + \frac{\Delta r(P)}{R_3 + R_1} \right) \cdot U_{z_p} \quad (2.4)$$

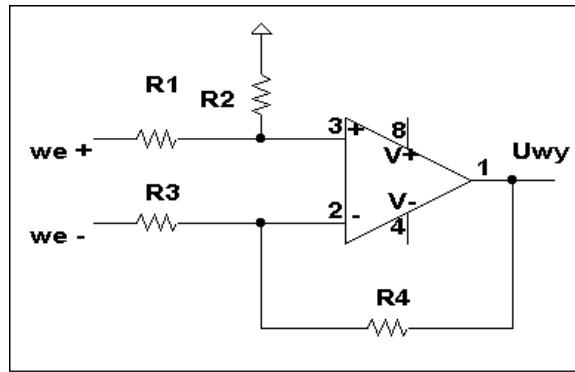
Dla ciśnienia $P=0$ mostek jest teoretycznie w stanie równowagi i $U_{wy_r}(P=0) = 0V$.

Z tego powodu w dalszej części opisu zamiast mówić o zmianie napięcia wyjściowego ΔU_{wy_r} będzie się mówić po prostu o napięciu U_{wy_r} .

Względne zmiany rezystancji elementów mostka, wywołane zmianą mierzonej wielkości są zwykle niewielkie – kilka %, stąd wyjściowe napięcie różnicowe U_{wy_r} jest na ogół wielokrotnie mniejsze od napięcia każdego z wyjść z osobna:

$$U_{wy_r} \ll (U_{wy_-}, U_{wy_+}) \approx U_{wy_s}$$

Typowe wartości mierzonych napięć różnicowych U_{wy_r} są na poziomie od kilku do kilkudziesięciu miliwoltów. Dołączony do mostka wzmacniacz powinien zatem umożliwić wzmocnienie niewielkiego sygnału różnicowego U_{wy_r} bez względu na poziom znacznie większej składowej sumacyjnej U_{wy_s} . Takimi cechami charakteryzuje się, na przykład, wzmacniacz różnicowy, zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym, pokazany na rys. 2.



Rys. 2 Wzmacniacz różnicowy ze wzmacniaczem operacyjnym

W układzie wzmacniacza różnicowego pokazanego na rys. 2 musi być spełniony warunek: $R1R4=R3R2$. Wzmocnienie różnicowe tego wzmacniacza wynosi wówczas (przy założeniu, że wzmacniacz operacyjny jest układem idealnym):

$$Ku_r = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta(U_{we+} - U_{we-})} = \frac{R4}{R3} \quad (2.5)$$

Natomiast jego napięcie wyjściowe:

$$U_{wy} = Ku_r (U_{we+} - U_{we-}) = Ku_r U_{we,r} \quad (2.6)$$

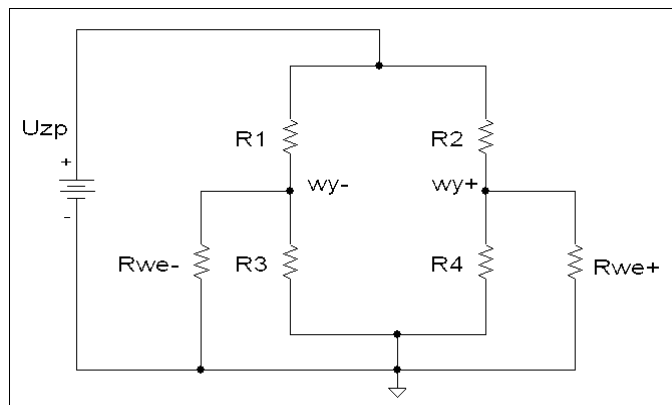
W praktyce rezystory R1 do R4 powinny mieć tolerancje nie przekraczające 0,5%.

Rezystancje wejściowe układu wzmacniacza różnicowego z rys. 2, mierzone na wejściu nieodwracającym we_+ i na wejściu odwracającym we_- , wynoszą odpowiednio:

$$R_{we+} = R1 + R2$$

$$R_{we-} = R3$$

Rezystancje wejściowe nie są sobie równe. Oznacza to, że dołączenie wzmacniacza z rys.2 do wyjścia mostka z rys. 1. zmieni rozkład wartości rezystancji układu, co pokazano na rys. 3. Rezystancje wejściowe wzmacniacza łączą się równolegle z rezystorami R3 i R4 mostka. Powoduje to zmianę warunków jego równowagi.



Rys. 3 Wpływ rezystancji wejściowych wzmacniacza różnicowego na elementy mostka rezystancyjnego.

Jeżeli rezystancje wejściowe wzmacniacza różnicowego będą dużo większe (co najmniej kilkadziesiąt razy) od rezystorów mostka, wówczas ich wpływ na mierzone napięcie wyjściowe mostka będzie niewielki.

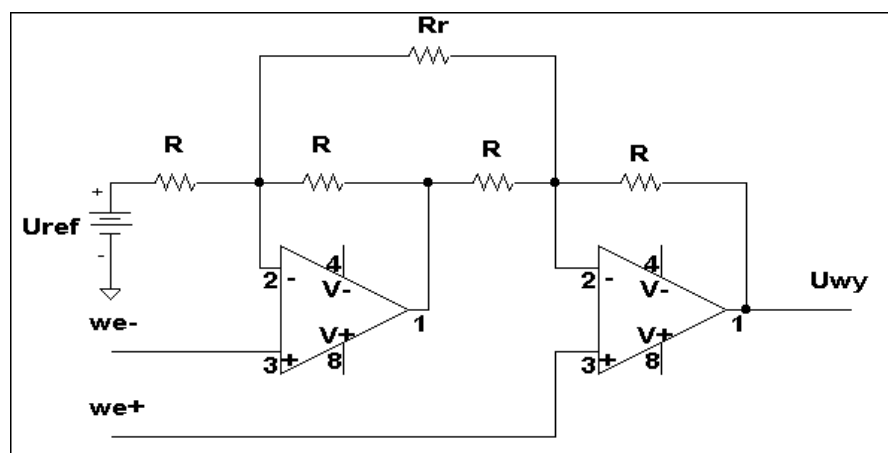
Dobrym przykładem ilustrującym wymagania, które powinien spełniać wzmacniacz, są tzw. pomiary elektrokardiograficzne (ekg). Polegają one na pomiarze napięć występujących pomiędzy elektrodami przyłożonymi do ciała człowieka - mierzony jest czasowy przebieg ich różnicy. Otrzymany wykres obrazuje pracę serca. Wartości napięć pomiędzy elektrodami są na poziomie miliwoltów. Wpływ wzmacniacza na mierzone napięcia powinien być jak najmniejszy. Oznacza to, że jego rezystancje wejściowe powinny być odpowiednio duże i praktycznie równe. Ponadto, w ciele człowieka indukują się napięcia, których źródłem są głównie zmienne pola elektromagnetyczne (pochodzące zwykle z sieci energetycznej). Wartości tych napięć mogą osiągać poziom kilkadziesiątu woltów. Wzmacniacz nie powinien na nie reagować.

Wzmacniacz służący do pomiaru niewielkich napięć różnicowych, występujących na tle względnie dużych składowych sumacyjnych (napięcia wspólne na poziomie woltów, natomiast ich różnica jest na poziomie miliwoltów) powinien charakteryzować się następującymi parametrami:

1. Równe sobie i możliwie jak największe rezystancje wejściowe.
2. Regulowane wzmocnienie sygnału różnicowego K_{ur} , przy czym regulacja nie może wpływać na parametry mierzonego układu.
3. Zerowe wzmocnienie dla składowych wspólnych co oznacza, że napięcie wyjściowe wzmacniacza powinno zależeć wyłącznie od różnicy napięć wejściowych ($K_{us}=0$)
4. Z punktów 2 i 3 wynika, że współczynnik tłumienia składowej wspólnej CMRR powinien być jak największy. Dobre wzmacniacze uzyskują CMRR o wartości ponad 120dB.

Warunki takie spełnia tzw. **wzmacniacz pomiarowy** (ang. *instrumentation amplifier*). Wzmacniacz pomiarowy jest układem złożonym z kilku wzmacniaczy operacyjnych. Jego symbol graficzny jest taki sam jak zwykłego wzmacniacza operacyjnego. Wzmacniacze pomiarowe produkowane są jako układy scalone, np. AD620 firmy Analog Devices. Jego wzmocnienie jest ustalane przy pomocy zewnętrznego rezystora.

Na rys. 4 i 5 pokazano dwie typowe struktury wzmacniaczy pomiarowych.



Rys. 4 Wzmacniacz pomiarowy złożony z dwóch wzmacniaczy operacyjnych

Napięcie wyjściowe wzmacniacza z rys. 4 wynosi:

$$U_{wy} = 2 \cdot \left(1 + \frac{R}{R_r}\right) \cdot (U_{we+} - U_{we-}) + U_{ref} = K_{u_r} \cdot (U_{we+} - U_{we-}) + U_{ref} \quad (2.7)$$

Jego wzmocnienie różnicowe K_{u_r} wynosi:

$$K_{u_r} = 2 \cdot \left(1 + \frac{R}{R_r}\right) \quad (2.9)$$

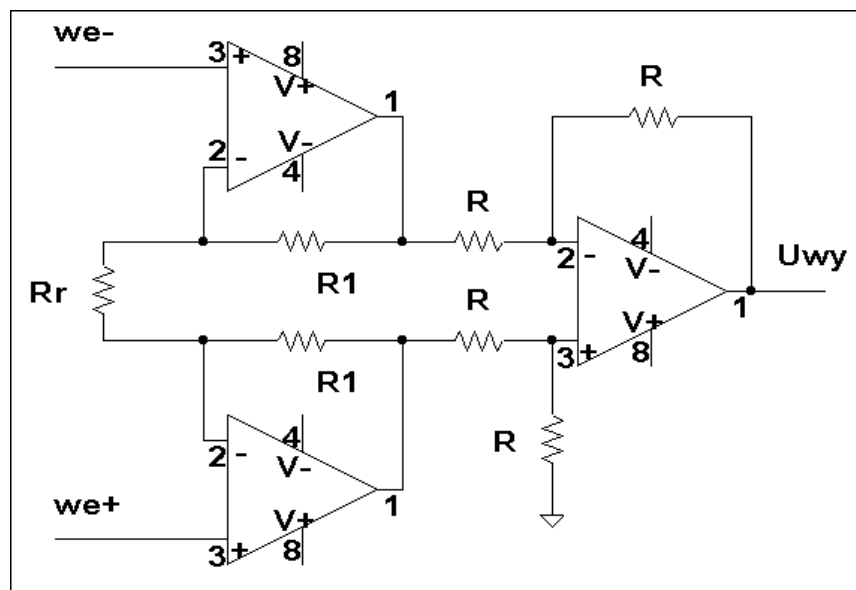
Rezystory R powinny być dobierane z tolerancją nie większą od 0,5%. Od dokładności doboru tych rezystorów zależy współczynnik CMRR. W wykonaniach firmowych CMRR > 100dB.

Napięcie wyjściowe wzmacniacza pomiarowego z rys. 5 wynosi:

$$U_{wy} = 2 \cdot \left(1 + \frac{R}{R_r}\right) \cdot (U_{we+} - U_{we-}) = K_{u_r} \cdot (U_{we+} - U_{we-}) \quad (2.10)$$

Jego wzmocnienie różnicowe wynosi:

$$K_{u_r} = 1 + \frac{2 \cdot R1}{R_r} \quad (2.11)$$



Rys. 5 Wzmacniacz pomiarowy złożony z trzech wzmacniaczy operacyjnych (np. AD620).

Rezystory R powinny być dobrane z tolerancją nie większą niż 0,5%. Tolerancje rezystorów R1 nie wpływają na tłumienie składowej wspólnej tylko na błąd wzmocnienia.

Obydwa wzmacniacze cechują się dużymi i w przybliżeniu równymi (o ile wewnętrzne wzmacniacze operacyjne mają zbliżone parametry) rezystancjami wejściowymi R_{we+} i R_{we-} które, przy wzmacniaczach z tranzystorami polowymi na wejściach, osiągają wartości setek megaomów. Możliwe w praktyce do uzyskania wzmocnienia różnicowe K_{u_r} wynoszą od kilku V/V do kilkuset V/V.

3. Przetwornik ciśnienia

W ćwiczeniu zastosowano kalibrowany i kompensowany termicznie piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia względnego MPX2010 firmy Motorola. W tabeli 1 pokazano jego wybrane parametry.

Tabela 1. Wybrane parametry przetwornika ciśnienia MPX2010

Parametr	symbol	min	typ	max	jednostka
Zakres mierzonych ciśnień	P_{OP}	0	-	10	kPa
Prąd zasilania	I_{zp}		6.0		mA
Napięcie zasilania	U_{zp}	-	10	16	V
Czułość	$\Delta U/\Delta P$	-	2,5	-	mV/kPa
Zmiana napięcia wyjściowego (span range)	U_{FSS}	24	25	26	mV
Offset	U_{off}	-1,0	-	+1,0	mV
Wpływ temperatury na U_{FSS} ¹⁾	TCU_{FSS}	-1,0	-	+1,0	% U_{FSS}
Wpływ temperatury na Offset	TCU_{off}	-1,0	-	+1,0	mV
Impedancja wejściowa	Z_{in}	1000	-	2550	om
Impedancja wyjściowa	Z_{out}	1400	-	3000	om
liniowość	-	-1,0	-	+1,0	% U_{FSS}

¹⁾ zmiana U_{FSS} przy ciśnieniu 10kPa, w zakresie temperatur od 0 do 85°C, mierzona względem 25°C.

Przetwornik MPX2010 mierzy **różnicę** ciśnień $P=P_1-P_2$ o maksymalnej wartości $P_{max}=P_{OP}=10kPa$. Różnicowe napięcie wyjściowe przetwornika określa wzór:

$$U_{wy_r} = \text{czułość} (P_1 - P_2) + U_{off} \quad (3.1)$$

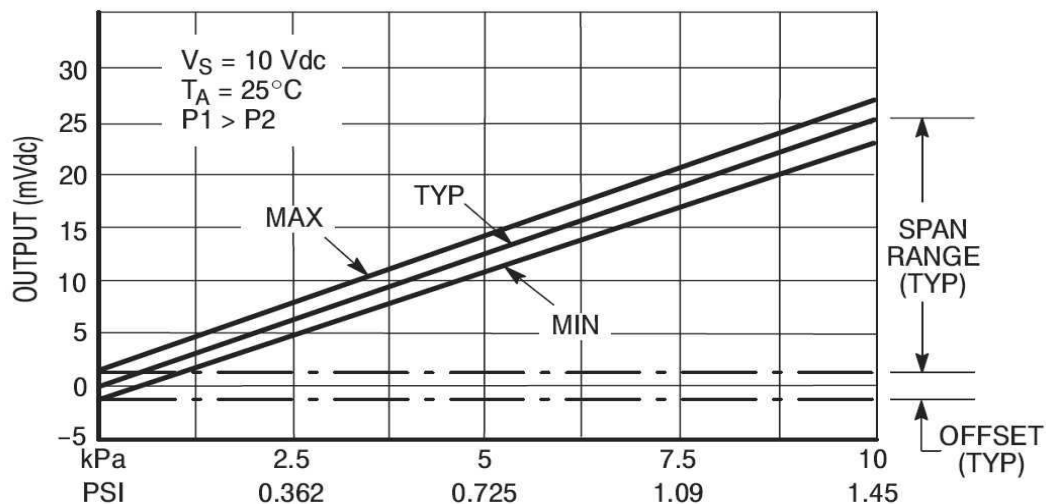
gdzie:

P_1 - ciśnienie doprowadzone do jednego otworu czujnika (O1)

P_2 - ciśnienie doprowadzone do drugiego otworu czujnika (O2)

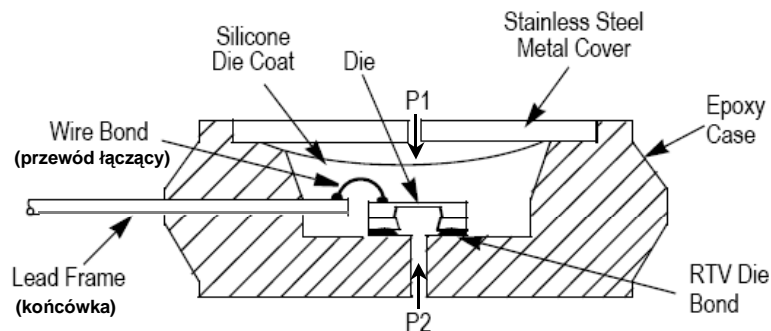
Ciśnienie P_1 nie może być mniejsze od P_2 ($P_1 \geq P_2$).

Na rys. 6 pokazano charakterystyki przetwarzania przetwornika MPX2010



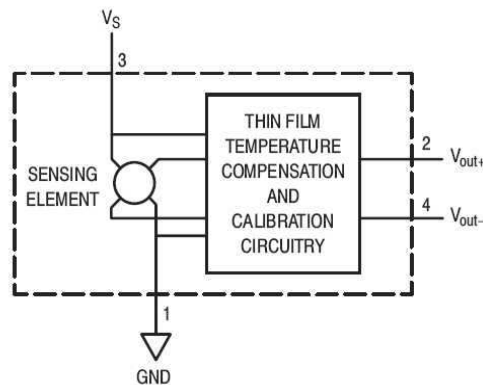
Rys. 6 Charakterystyki przetwornika MPX2010 (na podstawie MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA, MPX2010/D, rev. 9, Motorola Inc. 2002)

Przetwornik ciśnienia składa się rezystorów połączonych w układzie mostka (tak jak na rys. 1). Rezystory zmieniają swoją wartość w zależności od wywieranego na nie nacisku. Uproszczoną budowę przetwornika pokazano na rys. 7.



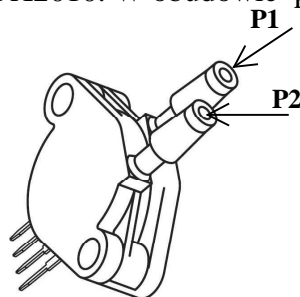
Rys. 7. Uproszczona budowa wewnętrzna piezorezystancyjnego przetwornika ciśnienia

Do rezystorów przetwornika dołączony jest cienkowarstwowy rezystancyjny układ kalibracji i kompensacji termicznej. Schemat wewnętrznych połączeń przetwornika i oznaczenia końcówek pokazano na rys.8.



Rys. 8. Schemat wewnętrznych połączeń przetwornika MPX2010 i ozanaczenie końcówek (ibid)

Na rys. 9 pokazano wygląd czujnika MPX2010. W obudowie przetwornika znajdują się dwa otwory,



Rys. 9. Czujniki ciśnienia MPX2010

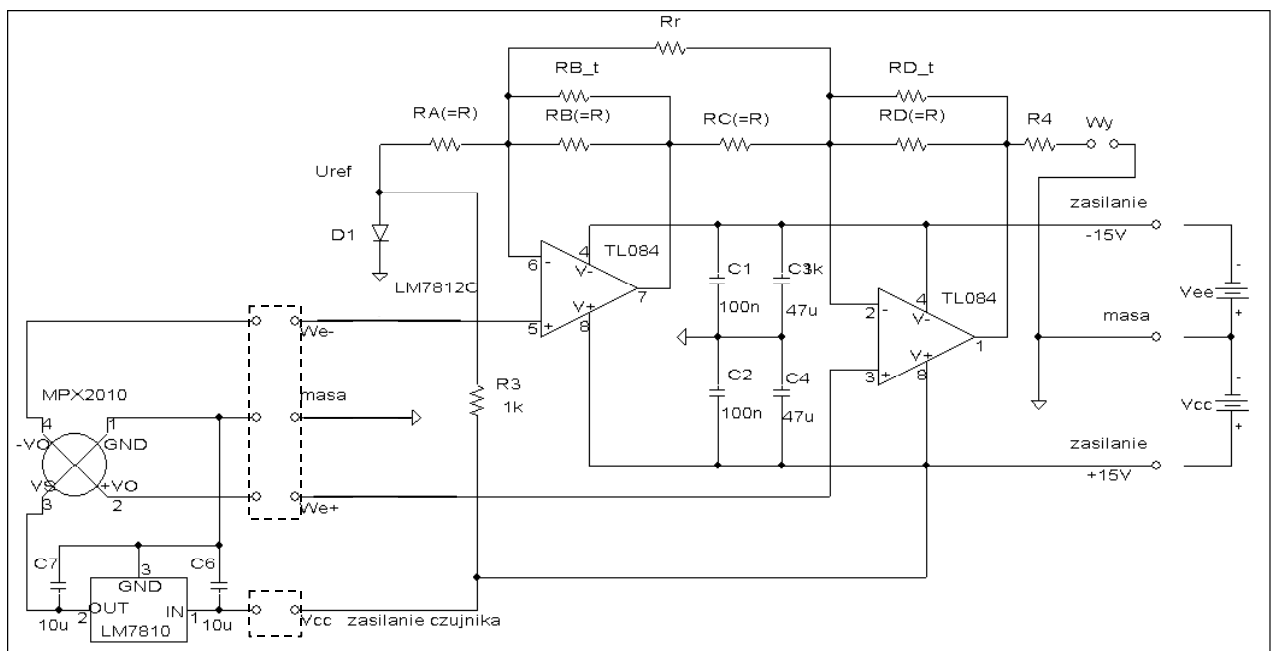
przez które doprowadza się do jego wnętrza ciśnienia P1 i P2. Ciśnienie P1 nie może być mniejsze od ciśnienia P2. Czynnikiem przekazującym ciśnienie jest powietrze lub inny niereaktywny chemicznie gaz. Różnica doprowadzonych ciśnień $P=P_1-P_2$ powoduje powstanie siły, która naciska na membranę (Die rys. 7) z elementami piezorezystancyjnymi. Zmiana rezystancji elementów mostka powoduje powstanie na wyjściu przetwornika napięcia U_{wy} , proporcjonalnego do wywieranej różnicy ciśnień $P=P_1-P_2$. W ćwiczeniu ciśnienie P2 jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Ciśnienie P1 jest

wytwarzane przez pompkę. W ten sposób przetwornik mierzy ciśnienie wywierane przez pompkę względem ciśnienia atmosferycznego.

Wartość wywieranego przez pompkę ciśnienia (P1) wskazuje manometr wodny (pomiar wysokości słupa wody).

4. Opis badanego układu

Na rys. 10 pokazano schemat badanego układu. Układ zbudowano na dwóch płytках drukowanych. Na pierwszej umieszczono przetwornik MPX2010 i jego układ zasilania. Na drugiej umieszczono elementy wzmacniacza pomiarowego. Obie płytki łączy się przewodami. Napięcie U_{ref} jest wytwarzane przez spadek napięcia na diodzie D1. Układ jest zasilany z dwóch zasilaczy, dostarczających napięć $V_{cc}=V_{ee}=15V$ (tzw. zasilanie symetryczne). Przetwornik MPX2010 jest zasilany napięciem 10V, dostarczonym przez stabilizator LM7810. Kondensatory C1 - C7 filtrują napięcia zasilające, zwierając niepożądane składowe zmienne do masy. Rezystor R_{B_t} służy do symulowania zmian rezystancji R_B wynikających z jej tolerancji wykonania. Podobną rolę pełni rezystor R_{D_t} . W układzie $R_A=R_B=R_C=R_D=R$. Rezystor R_r ustala wzmocnienie wzmacniacza (wzór 2.9). Rezystor R4 chroni wyjście wzmacniacza operacyjnego.

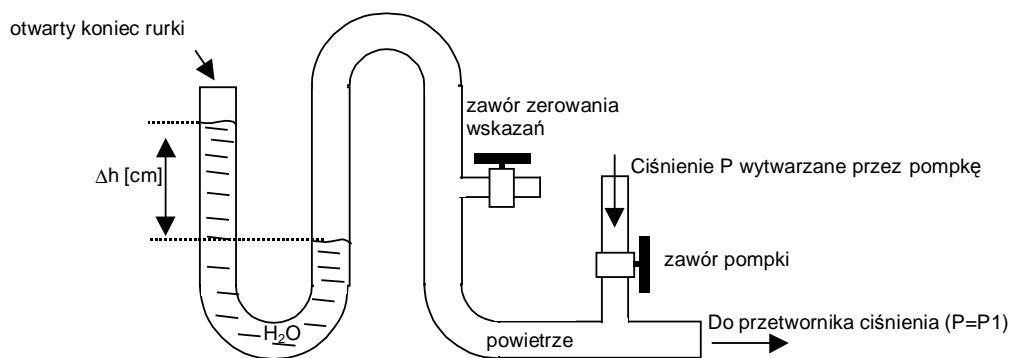


Rys.10. Schemat badanego wzmacniacza pomiarowego z przetwornikiem ciśnienia MPX2010

Na rys. 11 pokazano uproszczoną budowę manometru. Pompka (strzykawka) tłoczy przez zawór powietrze do układu pomiarowego. Sprężone powietrze jest doprowadzane do czujnika ciśnienia (otwór P1) oraz do rurki w kształcie litery U. Umieszczona w tym miejscu skala umożliwia odczyt różnicy poziomów słupów wody. Zawór zerowania wskazań służy do wypuszczania sprężonego powietrza z układu.

UWAGA.

Nie wolno cofać (wyciągać) tłoczka pompki, jeśli zawór zerowania wskazań jest zamknięty ! Grozi to uszkodzeniem czujnika wskutek wytworzenia podciśnienia w otworze P1.



Rys. 11. Manometr wodny

Z rys. 11 wynika, że wytworzone przez pompkę ciśnienie P powietrza doprowadzonego do przetwornika ciśnienia wynosi:

$$P = \frac{\Delta h}{10} \text{ [kPa]} \quad (4.1)$$

gdzie:

P - wytworzone ciśnienie w kPa

Δh - różnica w wysokości słupów wody w cm (100cm odpowiada ciśnieniu 10kPa)

5. Zadanie projektowe

Mniej więcej tydzień przed wykonywaniem ćwiczenia Prowadzący podaje studentom parametry układu pomiarowego. Zadaniem studentów jest obliczenie parametrów wzmacniacza pomiarowego oraz określenie wartości elementów układu.

Przy pomocy komputera (program Pspice) należy zmierzyć następujące parametry wzmacniacza pomiarowego:

- wzmocnienie różnicowe $Ku_r(f)$ w funkcji częstotliwości
- wzmocnienie sumacyjne $Ku_s(f)$ w funkcji częstotliwości. Przyjąć 0,5% rozrzuty wartości rezystorów R .
- współczynnik tłumienia składowej wspólnej $CMRR(f)$ - wykorzystać analizę *Monte Carlo* do określenia wpływu 0,5% tolerancji rezystorów R na parametr $CMRR$.
- statyczną charakterystykę przejściową wzmacniacza $U_{wy}=f(U_{we_r})$

Wykonanie obliczeń i symulacji oraz ich staranne zdokumentowanie jest warunkiem przystąpienia do ćwiczenia.

6. Przebieg ćwiczenia

6.1. Montaż wzmacniacza pomiarowego

1. Przy pomocy omomierza **dobrac** rezystory R_A , R_B , R_C , R_D ($=R$) wzmacniacza pomiarowego, tak by różniły się jak najmniej - wykorzystać maksymalną rozdzielczość omomierza.
2. Zmontować układ wzmacniacza posługując się schematem montażowym z rys. 13.
3. Przy odłączonych przewodach zasilających ustawić napięcia zasilaczy na wartości 2x15V (zasilanie symetryczne).
4. Wyłączyć zasilacze.
5. Dołączyć przewody zasilające (sprawdzić, czy nie ma błędów - poprawić !)

6. Do wyjścia wzmacniacza dołączyć oscyloskop w trybie AC i woltomierz napięcia stałego (DC).
7. Zewrzeć oba wejścia wzmacniacza z masą.
8. Włączyć zasilanie. Napięcie stałe na wyjściu powinno być niewielkie (części wolta). Przebieg na oscyloskopie może być lekko zaszumiony. Jeżeli jest inaczej - sprawdzić połączenia i napięcia zasilające.

6.2 Pomiar parametrów wzmacniacza z rezystorami o dobieranych wartościach

I. Pomiar statyczny wzmocnienia sumacyjnego Ku_s :

1. Doprowadzić do **zwartych** wejść We_+ i We_- wzmacniacza napięcie stałe $U_{we_s}=0V$ (ZERO).
2. Zwiększyć napięcie wejściowe o $\Delta U_{we_s}=+4V$ i zmierzyć odpowiadające temu zmiany napięcia wyjściowego ΔU_{wy} .
3. Obliczyć statyczne wzmocnienie sumacyjne Ku_s :

$$Ku_s = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we_s}} \text{ [V/V]}$$

II. Pomiar statyczny wzmocnienia różnicowego Ku_r

1. Wejście odwracające (We_-) wzmacniacza połączyć przewodem z masą.
2. Do wejścia nieodwracającego (We_+) doprowadzić napięcie $U_{we_r}=0V$ (ZERO) z oddzielnego zasilacza.
3. Zmieniając napięcie U_{we_r} o wartość ΔU_{we_r} =kilkanaście mV - może być potrzebny dodatkowy dzielnik rezystancyjny - zmierzyć zmiany napięcia wyjściowego ΔU_{wy} .
4. Wzmocnienie różnicowe obliczyć ze wzoru:

$$Ku_r = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we_r}}$$

III. Obliczenie statycznego współczynnika CMRR

1. Współczynnik CMRR obliczyć z zależności:

$$CMRR = \frac{Ku_r}{Ku_s}$$

Współczynnik CMRR wyrazić w decybelach. Wyniki pomiarów umieścić w tabeli 1.

- ### IV. Po konsultacji z prowadzącym zmierzyć charakterystyki wzmocnienia sumacyjnego Ku_s , różnicowego Ku_r i parametru CMRR w funkcji częstotliwości. Narysować przebiegi tych charakterystyk.

6.3 Pomiar parametrów wzmacniacza z rezystorami o różnych wartościach

1. Odłączyć zasilanie
2. Dołączyć do układu rezystory symulujące rozrzut wartości elementów, wynikający z ich tolerancji np. o 1% (skonsultować z Prowadzącym).
3. Powtórzyć pomiary opisane w punktach I-IV.

Wyniki umieścić w tabeli 1.

Tabela 1. Wpływ rozrzutu wartości rezystorów na parametry wzmacniacza pomiarowego

Parametr wzmacniacza	Rezystory kalibrowane	Rezystory niekalibrowane
Wzmocnienie K_{u_r} [V/V]		
Wzmocnienie K_{u_s} [V/V]		
CMRR [dB]		

Skomentować otrzymane wyniki. Porównać je z wynikami symulacji (analiza Monte Carlo).

6.4 Pomiary wzmacniacza z przetwornikiem ciśnienia MPX2010

1. Odłączyć zasilanie.
2. Połączyć przewodami gniazda płytki przetwornika ciśnienia z gniazdami wzmacniacza - osobny przewód zasila płytkę czujnika napięciem +15V.
3. Połączyć przetwornik z manometrem – rurka do otworu P1 (rys. 14).
4. Włączyć zasilanie.
5. **Otworzyć obydwa** zawory i wysunąć tłoczek pompki.
6. Zamknąć zawór zerujący.
7. Wciskając stopniowo tłoczek pompki zwiększać wartość ciśnienia w układzie pomiarowym, odczytując i zapisując w tabeli 2 uzyskane wyniki:

- Δh - różnica w wysokościach słupów wody w manometrze w centymetrach,
 P - obliczone ze wzoru: $P=0,1\Delta h$ [kPa] ciśnienie w układzie,
 $U_{wyMPX2010}$ - zmierzone napięcie stałe na wyjściu przetwornika (=wejścia wzmacniacza)
 U_{wy} - zmierzone napięcie stałe na wyjściu wzmacniacza

JEŻELI TRZEBA POWTÓRZYĆ KTÓRYŚ Z POMIARÓW TO NAJPIERW OTWORZYĆ ZAWÓR ZERUJĄCY I DOPIERO POTEM WYSUNĄĆ TŁOCZEK POMPKI.

Tabela 2. Zmierzone i obliczone parametry w układzie pomiarowym

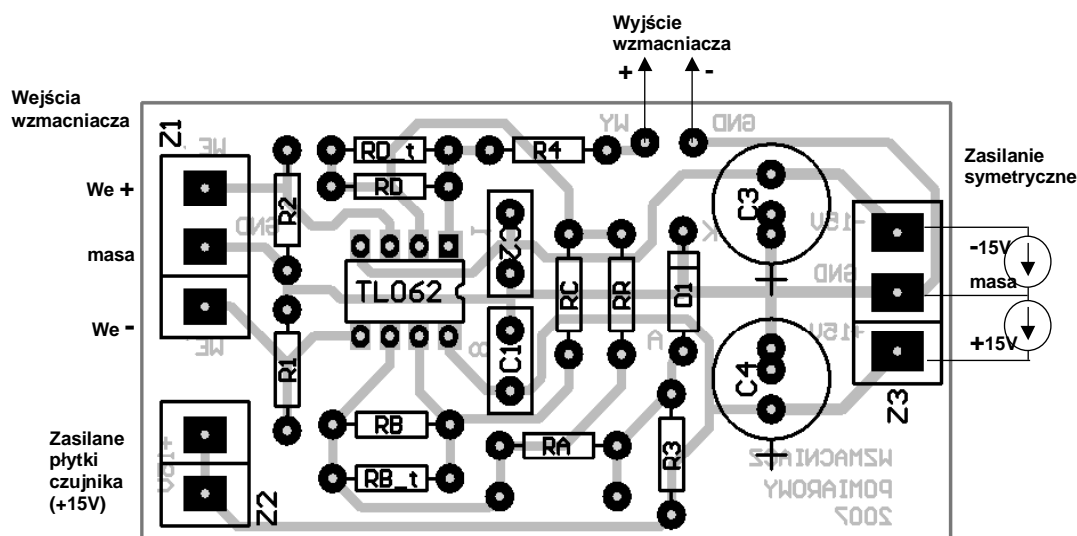
lp.	Δh [cm H ₂ O]	P [kPa]	$U_{wyMPX2010}$ [mV]	U_{wy} [V]
1	0	0		
2				
...				

8. Na podstawie danych z tabeli 2 narysować charakterystyki:
 - $U_{wyMPX2010} = f_{MPX2010}(P)$: charakterystyka statyczna przetwornika ciśnienia MPX2010,
 - $U_{wy} = f_p(P)$: charakterystyka statyczna układu pomiarowego.
 Określić liniowość zmierzonych charakterystyk.

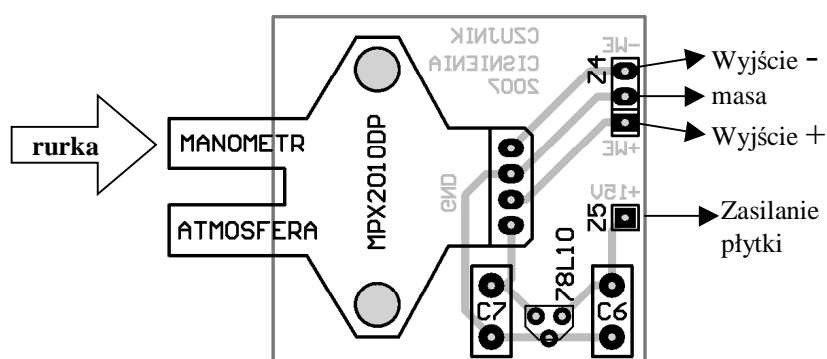
7. Płytki zestawu laboratoryjnego

Na rysunkach 13 i 14 pokazano płytki zestawu laboratoryjnego. Zaznaczono na nich punkty odpowiadające:

1. Wyjściu wzmacniacza (U_{wy}).
2. Zasilaniu oraz masy układu.
3. Wejściom wzmacniacza W_e- i W_e+ .
4. Zasilaniu przetwornika ciśnienia MPX2010.



Rys. 13. Płytką wzmacniacza pomiarowego, widok mod strony elementów.



Rys. 14. Płytką przetwornika MPX2010, widok od strony elementów.

8. Zagadnienia

1. Budowa, działanie i parametry wzmacniaczy operacyjnych
2. Budowa i właściwości wzmacniaczy pomiarowych
3. Pomiary przy wykorzystaniu mostków
4. Wpływ skończonej wartości współczynnika CMRR na dokładność pomiarów mostkowych

9. Bibliografia

1. Golde W., Śliwa L., *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania, cz.1, Podstawy teoretyczne*, Warszawa, WNT 1982.
2. Guziński A., *Liniowe, elektroniczne układy analogowe*, Warszawa WNT 1993.
3. Kulka Z., Nadachowski M., *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania, cz. 2, Realicje praktyczne*, Warszawa WNT 1982.
4. Kuta S., *Elementy i układy elektroniczne, cz. 1*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2001.
5. Prałat A., *Laboratorium układów elektronicznych, cz. 2*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.