

Ćwiczenie nr 3. CZUJNIKI DO POMIARÓW CIŚNIENIA

Cel ćwiczenia: Celem ćwiczenia jest poznanie niektórych czujników ciśnienia, ich parametrów metrologicznych oraz możliwości zastosowania w aparaturze pomiarowej.

Program ćwiczenia:

1. Przeczytać instrukcję do ćwiczenia. Zapoznać się z instalacją na stanowisku laboratoryjnym (Rys.8). Sprawdzić poprawność połączeń, a w razie potrzeby połączyć układ pomiarowy.
2. Ustawić odpowiednie wartości zakresów pomiarowych na miernikach. Zapisać wartość napięcia na uzwojeniu pierwotnym U_{ZAS} (powinno być ok **1,4V**) oraz częstotliwość f_{ZAS} (powinno być **5kHz**). Zmieniać ciśnienie na wejściu czujników w zakresie 0-1,2 kG/cm² co 0,1 w górę i w dół.

Zapisać wartości napięć na wyjściu czujnika transformatorowego U_{TR} i piezorezystancyjnego U_{PR}

3. Badania z punktu 2 powtórzyć dla częstotliwości f_{ZAS} (**4kHz i 7kHz**) i napięcia zasilającego U_{ZAS} (**1,2V i 1,6V**) na uzwojeniu pierwotnym czujnika transformatorowego
4. Przeprowadzić analizę wyników pomiarów dla transformatorowego czujnika ciśnienia:
 - wyznaczyć charakterystykę statyczną czujnika, $U_{TR}=f(p_a)$
 - wyznaczyć czułość czujnika
 - określić histerezę pomiarową czujnika: $\Delta H = |U(p \uparrow) - U(p \downarrow)|_{max}$ i $\delta H = \frac{|U(p \uparrow) - U(p \downarrow)|_{max}}{U_{max} - U_{min}}$
 - określić wpływ częstotliwości i napięcia zasilającego czujnik na wyznaczone parametry statyczne,
 - wyznaczyć procentowy współczynnik podatności czujnika na zmianę napięcia zasilania dla dwóch różnych ciśnień (ok. 0,4 i 0,8 p_{MAX}) według wzoru

$$K_U = \frac{\left(\frac{U_{TR2} - U_{TR1}}{U_{TR}} \right)}{\left(\frac{U_{ZAS2} - U_{ZAS1}}{U_{ZAS}} \right)} \cdot 100\%$$

- wyznaczyć procentowy współczynnik podatności czujnika na zmianę częstotliwości napięcia zasilania dla dwóch różnych ciśnień (ok. 0,4 i 0,8 p_{MAX}) według wzoru

$$K_U = \frac{\left(\frac{U_{TR2} - U_{TR1}}{U_{TR}} \right)}{\left(\frac{f_{ZAS2} - f_{ZAS1}}{f_{ZAS}} \right)} \cdot 100\%$$

5. Przeprowadzić analizę wyników pomiarów dla piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia.

Uwaga! Czujnik piezorezystancyjny nie jest zasilany z generatora zmian U_{ZAS} i f_{ZAS} nie ma wpływu na parametry statyczne tego czujnika (zbadać powtarzalność poszczególnych parametrów)

- wyznaczyć charakterystykę statyczną czujnika $U_{TR}=f(p_a)$
- wyznaczyć czułość czujnika
- określić histerezę pomiarową czujnika: $\Delta H = |U(p \uparrow) - U(p \downarrow)|_{max}$ i $\delta H = \frac{|U(p \uparrow) - U(p \downarrow)|_{max}}{U_{max} - U_{min}}$

Uwaga: Powyższe badania przeprowadzić dla temperatury otoczenia oraz dla temperatury ok. 40°C ustawionej w komorze temperaturowej, zgodnie z zaleceniami prowadzącego.

6. Określić powtarzalność wyników pomiaru ciśnienia ok. 0,4 i 0,8 p_{MAX} . Wykonać co najmniej 10 pomiarów w tych samych warunkach, obliczyć średnią i odchylenie standardowe.
7. Przeprowadzić porównanie manometru cyfrowego MK-10 i analogowego MERA KFM,
 - Wartości wskazywane na manometrze analogowym przeliczyć na kPa i porównać na wykresie z wartościami wskazanymi na manometrze cyfrowym,

Przykładowe tabele

Tab. 1. Wyniki pomiaru zależności napięć na wyjściu czujników ciśnienia piezorezystancyjnego U_{PR} (zakres pomiarowy) i transformatorowego U_{TR} (U_{ZAS} = ..., f_{ZAS} =....., zakres pomiarowy....) od ciśnienia na wejściu czujnika. p_a – wartość ciśnienia wskazywana na manometrze analogowym, p_c – wartość ciśnienia wskazywana na manometrze cyfrowym. Temperatura w komorze pomiarowej T =

Lp	p_a [kG/cm ²]	p_c [kPa]	U_{PR} [mV]	ΔU_{PR} [mV]	δU_{PR} [%]	U_{TR} [mV]	ΔU_{TR} [mV]	δU_{TR} [%]
1								
...								
min 10								

Wprowadzenie:

Ciśnienie jest jedną z najczęściej mierzonych wielkości nieelektrycznych. Klasyczne pomiary ciśnienia wykonywane są z reguły czujnikami, w których ciśnienie oddziałuje na element sprężysty, jakim jest rurka Bourdon'a, mieszek, membrana itp., powodując jego "przemieszczenie". Przemieszczenie elementu sprężystego przekazywane jest, zwykle poprzez mechanizm przekładni zębatej, na wskazówkę. Obecnie, z uwagi na elektronizację wielu dziedzin życia, czujniki ciśnienia muszą pracować w elektronicznych (często skomputeryzowanych) systemach pomiarowych lub systemach automatycznej regulacji. W takich czujnikach niezbędne jest przetworzenie ciśnienia na sygnał elektryczny np. napięcie, prąd, częstotliwość, itp. Coraz bardziej powszechne stają się czujniki ciśnienia wyposażone w mikrokomputery (mikroprocesory) "pokładowe", w których dokonywana jest automatycznie linearyzacja charakterystyki przetwarzania, kompensacja wpływu temperatury, itp. oraz transmisja sygnału wg określonego standardu np. RS-232 do systemu zbierania danych.

Przedmiotem badania są czujniki ciśnienia (manometry) z elementem sprężystym (z rurka Bourdon'a), elektryczny czujnik transformatorowy, czujnik piezorezystancyjny oraz manometr cyfrowy.

1. Manometry sprężyste (ciśnieniomierze sprężyste)

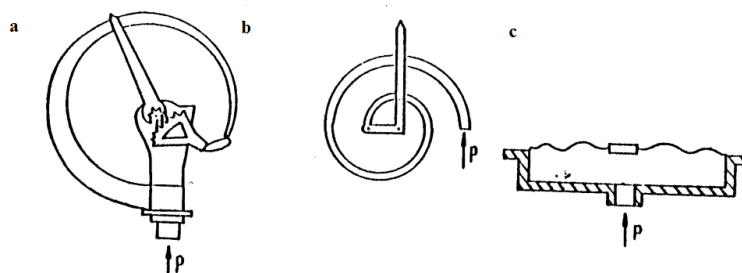
Zasada działania manometrów sprężystych opiera się na pomiarze odkształcenia elementu sprężystego pod wpływem mierzonego ciśnienia. Kształt naczyń sprężystych jest tak dobrany, aby mierzone odkształcenie s było liniową funkcją ciśnienia p .

$$S = \frac{Kp}{E} \quad (1)$$

gdzie: E - współczynnik sprężystości materiału

K - parametr zależny od kształtu elementu sprężystego.

Najbardziej rozpowszechnione są manometry sprężyste z rurką Bourdona (Rys. 1a).



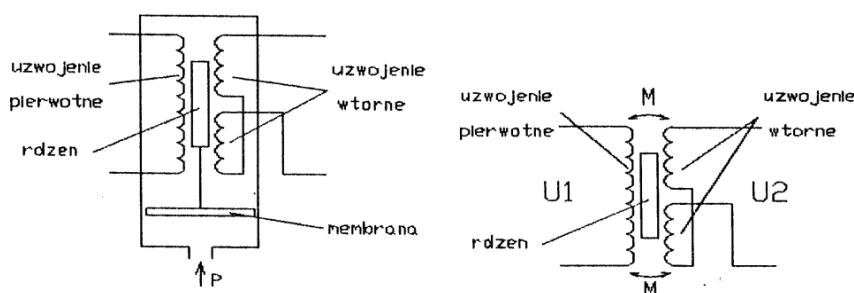
Rys. 1 Manometry sprężyste: a) z rurką Bourdona, b) z wielokrotną rurką Bourdona, c) membranowy

Ważną cechą manometrów sprężystych jest duża zdolność wykonywania pracy. Stąd chętnie są stosowane w urządzeniach rejestrujących. Takie rejestratory cechuje prosta konstrukcja - nie zawierają przekładni pośredniczących. Większą czułość pozwalają uzyskać manometry z wielokrotną rurką Bourdona (Rys. 1b). Zakres ciśnień mierzonych manometrami sprężystymi z rurką Bourdona wynosi $102 - 108 \text{ N/m}^2$. Zakres pomiarowy manometrów sprężystych membranowych (Rys. 1c) jest nieco niższy i wynosi $102 - 106 \text{ N/m}^2$. Manometry z elementami sprężystymi nie pozwalają na uzyskanie dużych dokładności. Przyczyną jest niestałość elementów sprężystych spowodowana ich starzeniem się, pełzaniem, histerezą.

Klasy dokładności manometrów zwykłych wynoszą 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4, a manometrów precyzyjnych 0,25 i 0,4.

2. Czujnik ciśnienia transformatorowy

W czujnikach tych wykorzystuje się do pomiarów zależność siły elektromotorycznej indukowanej z uzwojenia pierwotnego do uzwojenia wtórnego w różnych warunkach sprzężenia obu uzwojeń.



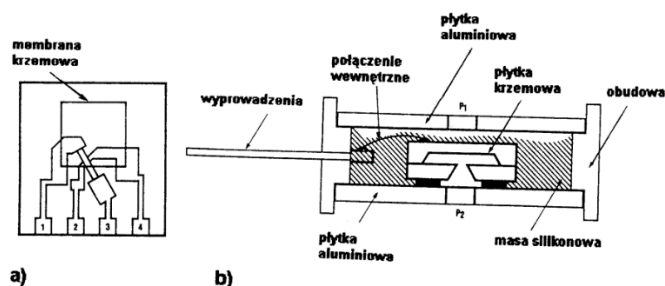
Rys. 2 Czujnik ciśnienia transformatorowy, różnicowy

Ciśnienie p poruszając membranę przesuwając rdzeń wykonany z materiału magnetycznego, który zmienia sprzężenie magnetyczne M pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniem wtórnym (Rys. 2). Wartość napięcia U indukowana w uzwojeniu wtórnym jest tym większa im większa część rdzenia jest pomiędzy nimi zawarta. W czujniku różnicowym na skutek przemieszczania się rdzenia wartość napięcia indukowanego w jednym uzwojeniu wtórnym rośnie, a w drugim maleje. Uzwojenia wtórne są łączone różnicowo, tak, że przy symetrycznym położeniu względem nich rdzenia napięcie na wyjściu jest równe zero. Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym jest proporcjonalne do napięcia zasilającego uzwojenie pierwotne oraz jego częstotliwości. W układach, w których napięcie i częstotliwość są stabilizowane, dokładność pomiaru takimi czujnikami jest rzędu 1%. **Czujniki transformatorowe, różnicowe cechuje duża czułość.**

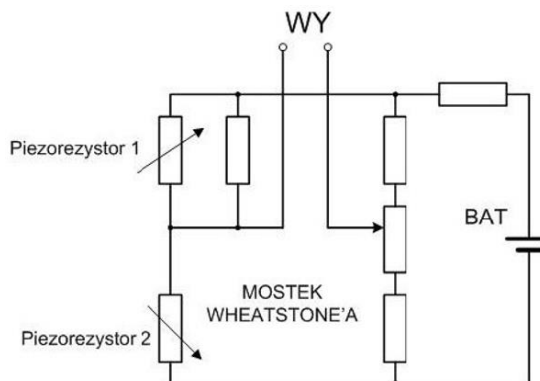
3. Czujnik piezorezystancyjny.

Technologia wytwarzania krzemowych czujników ciśnienia jest jedna z najdynamiczniej rozwijających się dziedzin technologii czujników pomiarowych. Czujniki te charakteryzują się bardzo małymi wymiarami, wysoką liniowością i czułością oraz bardzo małą bezwładnością. Typowy

piezorezystancyjny czujnik ciśnienia zbudowany jest z monokrystalicznej płytki krzemu, w której wytrawiona jest cienka membrana (grubości od kilku do kilkudziesięciu μm w zależności od zakresu ciśnienia). Na powierzchni membrany umieszczone są technika dyfuzji 2 lub 4 piezorezystory. Pod wpływem nacisku (ciśnienia) cieczy lub gazu na membranę, powstają w niej duże naprężenia, które powodują przyrost lub zmniejszenie rezystancji piezorezystorów. Zmiany rezystancji piezorezystorów są przetwarzane na sygnały elektryczne w mostkowych układach elektronicznych. Schemat budowy piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia przedstawia (Rys. 3 a i b), a podstawowy układ przetwarzania zmian rezystancji na sygnał elektryczny (mostek Wheatstone'a) przedstawia Rys. 4.



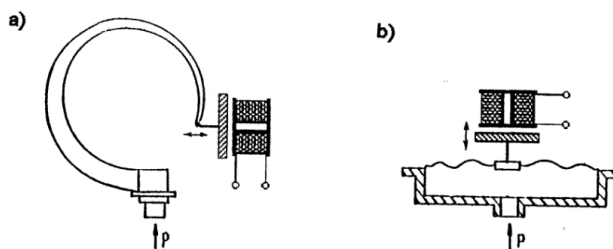
Rys. 3 Schemat budowy piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia: a) płytki krzemowej, b) konstrukcji wewnętrznej.



Rys. 4 Schemat podstawowego układu mostka Wheatstone'a do współpracy z czujnikiem piezorezystancyjnym (z dwoma piezorezystorami TM-520)

4. Manometr cyfrowy.

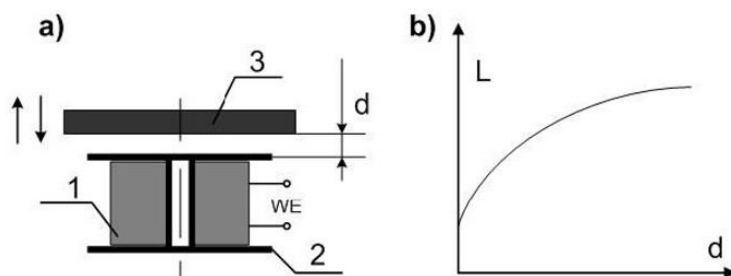
Manometr cyfrowy typ MK-10 zbudowany jest w oparciu o klasyczną rurkę Bourdon'a, na końcu której, przymocowana jest płytki metalowa (np. miedziana) Rys. 5. Płytki ta, porusza się w pobliżu cewki, z którą stanowi indukcyjnościowy czujnik przemieszczenia. Budowę takiego czujnika przedstawia Rys. 6.



Rys. 5 Schemat budowy manometru sprężystego z indukcyjnościowym czujnikiem przemieszczenia: a) z rurką Bourdona; b) membranowy

Działanie jego jest następujące: prąd przemienny przepływający przez cewkę wytwarza pole magnetyczne, pod którego wpływem w materiale przewodzącym płytki metalowej zbliżonej do cewki indukują się prądy wirowe. Prądy te, wytwarzające własne przeciwnie skierowane pole magnetyczne,

zmniejszają skojarzony z cewką strumień magnetyczny, a zatem i indukcyjność cewki, zależnie od szerokości szczeliny d . Zmiany indukcyjności przetwarzane są w elektronicznych układach generacyjnych na ciąg impulsów elektrycznych.



Rys. 6 Indukcyjnościowy czujnik działający na zasadzie prądów wirowych: a) budowa (1 - cewka, 2 - karkas, 3 - płytka metalowa); b) zależność indukcyjności L cewki od odległości d płytki metalowej

Częstotliwość impulsów jest zależna od ciśnienia. Impulsy te podawane są do wejścia licznikowego mikrokomputera (również do gniazda wyjściowego MK-10), który mierzy ich częstotliwość, linearyzuje zależność częstotliwości od ciśnienia, oblicza wynik pomiaru z korekcją wpływu temperatury, wyświetla dynamicznie wynik pomiaru ciśnienia oraz transmituje wartość mierzonego ciśnienia do IBM-PC. Zakres pomiarowy manometru MK-10 wynosi 160kP. Klasa 0.25, pozwala mu pełnić funkcje przyrządu wzorcowego. Posiada wyjście transmisji szeregową RS-232, umożliwiające podłączenie do IBM-PC.

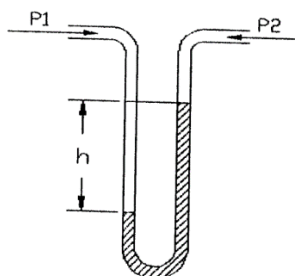
5. Manometr hydrostatyczny.

Manometr hydrostatyczny jest często stosowanym wzorcem ciśnienia. Najprostszą jego wersję stanowi manometr hydrostatyczny o kształcie litery U (U - rurka, Rys. 7). mierzący z zasady różnice ciśnień:

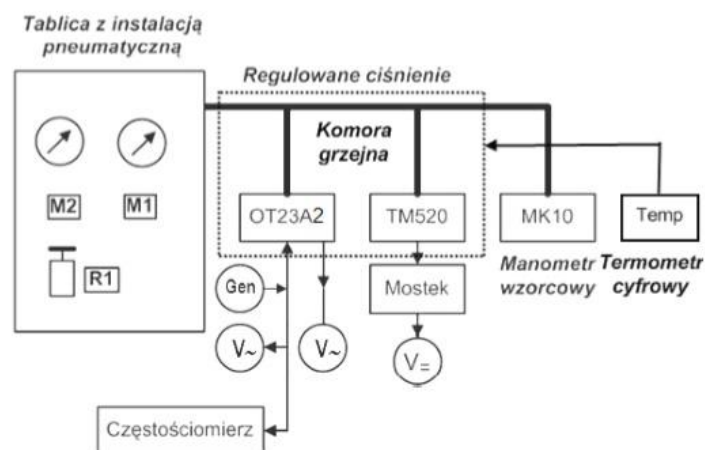
$$\Delta p = p_1 - p_2 = g \cdot h \cdot |p_1 - p_2|$$

gdzie: p_1, p_2 – ciśnienia,
 g – lokalne przyspieszenie ziemskie,
 h – różnica wysokości słupów cieczy w ramionach U-rurki.
 r – gęstość cieczy manometrycznej,
 r – gęstość czynnika wypełniającego resztę U-rurki.

Dokładność pomiaru ciśnienia z wykorzystaniem manometru hydrostatycznego zależy od kilku czynników, np. zjawiska włoskowatości, dokładności określenia g i p_1, p_2 , stabilności temperatury otoczenia, dokładności pionowego ustawienia manometru, równomierności przekroju rurki na całej jej długości.



Rys. 7 Manometr hydrostatyczny - U-rurka.



Rys. 8 Schemat połączeń układu do pomiaru charakterystyk czujników ciśnienia transformatorowego OT-23-A2, piezorezystancyjnego TM-520.

Gen – generator sygnału sinusoidalnego, $V_{\sim}$ – woltomierz napięcia zmiennego, $V_{=}$ – woltomierz napięcia stałego, M – manometry, R – reduktory ciśnienia.

Uwagi do wykonania programu ćwiczenia

Wykonując pomiary z wykorzystaniem pneumatycznej sieci należy zwrócić uwagę na szczegóły obsługi:

- 1 – uruchomienie sprężarki dostarczającej sprężone powietrze następuje po załączeniu przełącznikiem (do pozycji pionowej) znajdującego się na tablicy rozdzielczej ściennej umieszczonej obok tablicy z pneumatyczną siecią,
- 2 – wykręcenie reduktorów R (w lewo) powoduje zmniejszenie ciśnienia powietrza w instalacji,
- 3 – wkręcenie reduktorów R (w prawo) powoduje wzrost ciśnienia w instalacji.

Aby wykonać pomiary charakterystyk wymienionych czujników należy doprowadzić do sieci pneumatycznej sprężone powietrze o ciśnieniu ok. 2 at wskazywane na manometrze M1. Reduktorem R1 ustalić na manometrze M2 wskazanie równe 1,60 [kG/cm²]. Przez regulację reduktora R1 ustala się ciśnienie doprowadzone do badanych czujników.

Pytania kontrolne:

1. Przedstawić zasadę działania transformatorowego czujnika ciśnienia.
2. Przedstawić zasadę działania piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia.
3. Przedstawić zasadę działania czujnika wykorzystującego prądy wirowe.
4. Omówić sposób wyznaczania charakterystyki statycznej czujnika ciśnienia.
5. Omówić sposób wyznaczania histerezy czujnika ciśnienia.
6. Omówić sposób wyznaczania charakterystyki statycznej czujnika ciśnienia.
7. Omówić sposób wyznaczania współczynników podatności na zmiany napięcia i częstotliwości sygnału zasilającego transformatorowy czujnik ciśnienia.
8. Przeliczanie ciśnienia z danych wartości na wartości wyrażone w innych jednostkach (zadania obliczeniowe).

Literatura

1. Romer E., Miernictwo przemysłowe, Warszawa 1970, PWN, str. 97, str. 135-144
2. Łapiński M., Włodarski W., Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych, Warszawa 1969, WNT, str. 89
3. PN-66/M-53512. Ciśnieniomierz precyzyjny.
4. PN-66/M-53500. Ciśnieniomierze wskazówkowe zwykłe.

Dane techniczne badanych czujników

Czujnik transformatorowy OT-23-A2	Piezorezystancyjny czujnik ciśnienia TM-520
Zakres nominalny 2 at	(Wartości graniczne)
Przebieżalność 50% zakresu nominalnego	Zakres pomiarowy ciśnienia: 0...150 kPa
Napięcie zasilające 5 V +10% (wart. Skuteczna)	Dopuszczalne nadciśnienie 300 kPa
Częstotliwość 5kHz +5%	Natężenie prądu max. 15 mA
Pobór prądu ze źródła zasilania 20 mA	Napięcie zasilania max. 5 V
Dopuszczalna temperatura pracy -30 °C do +60 °C	Rezystancja izolacji min. 5 MΩ
Histeresa 1 % zakresu nominalnego	(Wartości charakterystyczne)
Nieliniowość +1 % zakresu nominalnego	Rezystancja min. - max. 800 - 1200 Ω
	Czułość min. 14 - 25 mV
	Nieliniowość max. 0.5 %
	Histeresa max. 0.5 %
	Temperaturowy współczynnik zmian napięcia wyjściowego przy ciśnieniu max. 1.0 % na 10 kPa

Jednostki ciśnienia

Nazwa	Symbol	Wartość
paskal	Pa	1 N/m ² =10 ⁻³ kN/m ² =10 ³ mN/m ² =10 ⁻⁵ bar
niuton na metr kwadratowy	N/m ² ; kg/m s ²	= 1.01972*10 ⁻⁵ kg/cm ² = 0.986923*10 ⁻⁵ at = 0.10974 mmH ₂ O = 7.5000062*10 ⁻³ mmH (lub Tr)
bar	bar	1 bar = 10 ⁵ N/m ²
kilogram siła na centymetr kwadratowy	kg/cm ²	1 kg/cm ² = 98066.5 N/m ²
(atmosfera techniczna)	at	1 at = 1 kg/cm ²
milimetr słupa wody	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9.8066 N/m ² = 10 ⁻⁴ at
milimetr słupa rtęci	mmHg	1 mmHg= 133.322N/m ² = 1/760 atm (atm. fizyczna)
tor	Tr	1 Tr = 1 mmHg = 133.322 N/m ²
hektopaskal	hPa	1 hPa = 100 Pa = 1 mbar = 10 mmH ₂ O
		*(ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza wynosi średnio 1013,25 hPa)

DODATEK

Wyciąg z PN-71/M-53511

1.2. Określenia .

1.2.1. Ciśnieniomierz – przyrząd służący do pomiaru ciśnienia.

1.2.2. Ciśnieniomierz zwykły – ciśnieniomierz ogólnego przeznaczenia wskazujący bez urządzeń do wykonywania funkcji dodatkowych (np. sygnalizacji lub zdalnego przekazywania wskazań).

1.2.3. Manometr – ciśnieniomierz do pomiaru nadciśnienia.

Wyciąg z PN –66/M-53500

Ciśnieniomierze wskazówkowe zwykle z elementami sprężystymi. Wymagania i nadania techniczne.

1.3.3. Klasa niedokładności – liczba wyrażająca bezwzględna wartość dopuszczalnych błędów podstawowych wskazań w użytkowaniu w procentach zakresu wskazań.

1.3.7. Histeresa pomiarowa – różnica wskazań dla tej samej wartości przy wzrastających i malejących ciśnieniach po lekkim opukaniu ciśnieniomierza przed dokonaniem odczytu. Po osiągnięciu górnej granicy zakresu wskazań należy wskazówkę przetrzymać przez 5 min.

1.4.7. Klasa niedokładności. W zależności od dopuszczalnych błędów rozróżnia się 5 klas ciśnieniomierzy wymienionych w tablicy 1. Ciśnieniomierze precyzyjne są wykonywane w klasach niedokładności 0.25 i 0.4.

2. Wymagania

2.7. Jednostki ciśnienia. Ciśnieniomierze powinny być wzorcowane w meganiutonach na metr kwadratowy (MN/m²).

2.8. Błędy podstawowe wskazań w temperaturze odniesienia 20 °C±5 °C nie powinny przekraczać błędów dopuszczalnych w zależności od klasy niedokładności podanych w tablicy 1.

Tablica 1.

Błędy podstawowe	Dopuszczalne wartości błędów podstawowych wskazań w % górnej granicy zakresów wskazań w temperaturze 20°C				
	Klasa niedokładności				
	0.6	1	1.6	2.5	4
	±0.6	±1	±1.6	±2.5	±4

2.9. Histeresa pomiarowa wskazań nie powinna być większa niż bezwzględna wartość dopuszczalnych błędów podstawowych wskazań podanych w tablicy 1.

2.10. Zmienność wskazań nie powinna przekraczać połowy dopuszczalnej wartości błędu podstawowego w użytkowaniu (tablica 2).

Tablica 2.

Górna granica zakresu wskazań		Przeciążalność w % górnej granicy zakresu wskazań
MN/m ²	kG/cm ²	
Do 10 włącznie	Do 100 włącznie	25

2.13. Dokładność zerowego wskazania.

Przy braku ciśnienia w obrębie elementu sprężystego (pomiarowego) koniec wskazówki powinien wskazywać zerową kreskę podziałki. Dopuszcza się odchylenie końca wskazówki w stosunku do kreski zerowej o wartość nie przekraczającą bezwzględnej wartości dopuszczalnego błędu podstawowego wskazań w użytkowaniu (tablica 1) jednak mniejszą niż długość działki elementarnej.

2.15. Odporność na przeciążenie ciśnieniem statycznym. Ciśnieniomierz obciążony w ciągu 15 min ciśnieniem statycznym określonym

w tablicy 2 nie powinien wskazywać błędów większych niż podane w p. 2.8.; 2.9; 2.10.