

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. ST. STASZICA W KRAKOWIE**
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń
Ochrony Środowiska

**TERMODYNAMIKA
LABORATORIUM**

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych:

POMIAR CIŚNIENIA

opracowali: dr inż. Krzysztof Szczotka
dr inż. Piotr Michalak
mgr inż. Jakub Szymiczek

Pomiar ciśnienia

Z definicji ciśnienie p oznacza stosunek siły F do pola powierzchni A , na które siła ta działa.

$$p = \frac{F}{A}$$

Wymiarem ciśnienia jest więc jednostka siły odniesiona do jednostki pola powierzchni.

1. Jednostki ciśnienia

1.1. Jednostki główne

W układzie SI jednostką główną jest 1 N/m^2 zwany paskalem [Pa].

$$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 1 \text{ Pa}$$

1.2. Wartość ciśnienia może być wyrażona wysokością słupa cieczy

Równoważąc mierzone ciśnienie słupem cieczy manometrycznej oblicza się jego wartość ze wzoru:

$$p = h_t \rho_t g$$

gdzie:

$h_t [m]$ - wysokość słupa cieczy manometrycznej w temperaturze pomiaru,

$\rho_t [\text{kg/m}^3]$ - gęstość cieczy manometrycznej w temperaturze pomiaru,

$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ - przyspieszenie grawitacyjne.

W przypadku stosowania wody jako cieczy manometrycznej można w uproszczeniu niezależnie od temperatury przyjąć: $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ i wówczas $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,80665 \text{ N/m}^2 = 9,80665 \text{ Pa}$

Przy zastosowaniu rtęci jako cieczy manometrycznej, ciśnienie mierzymy **wysokością słupa rtęci**. Jest to ciśnienie, przy którym spiętrzenie rtęci o temperaturze $t = 0^\circ\text{C}$ i gęstości $\rho_{\text{Hg}} = 13546 \text{ kg/m}^3$ wynosi 1 mm . Zamienną nazwą tej jednostki jest **1 tor [Tr]**.

$$1 \text{ Tr} = 13595 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8067 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ mm} = 133,32 \text{ Pa} \text{ oraz } 1 \text{ Tr} = 13,6 \text{ mm H}_2\text{O}$$

1.3. Jednostki pochodne i inne jednostki stosowane w praktyce

Jednostkami pochodnymi układu SI stosowanymi w praktyce są:

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa} = 10,197 \text{ kG/m}^2 \cong 10,2 \text{ mmH}_2\text{O} \cong 0,75 \text{ Tr}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,9869 \text{ atm} \cong 10197 \text{ mmH}_2\text{O} \cong 750 \text{ Tr} \cong 14,5 \text{ PSI}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Tr} \cong 1,01325 \text{ bar} = 1,033 \text{ at}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kG/cm}^2 = 0,980665 \text{ bar}$$

$$1 \text{ PSI} = 1 \text{ Lbf/in}^2 = 6895 \text{ Pa}$$

W fizyce i chemii stosuje się często jako jednostkę ciśnienia 760 Tr czyli **atmosferę fizyczną [atm]**. Stosowana jest również, zwłaszcza w starszych opracowaniach **atmosfera techniczna [at]**.

2. Ciśnienie statyczne p_s , całkowite p_c , dynamiczne p_d

Pomiar ciśnienia ma na celu określenie wartości jednego z głównych parametrów termodynamicznych płynu (cieczy, pary lub gazu), tj. ciśnienia statycznego.

Ciśnieniem statycznym p_s nazywamy ciśnienie płynu znajdującego się w spoczynku (np. ciśnienie w zbiorniku) względnie ciśnienie płynu przepływającego, ale mierzone w ten sposób, że prędkość przepływu w nie ma wpływu na wartość tego ciśnienia (ciśnienie jakie wskazywałby przyrząd poruszający się z prędkością strumienia płynu i w tym samym co strumień kierunku).

Jeżeli w strumieniu płynu umieścimy **małą** (w porównaniu do pola przekroju poprzecznego przepływającego płynu) przegrodę ustawioną **prostopadle** do kierunku prędkości w , w postaci np. płytki pomiarowej, to **na płycie** strumień zostanie całkowicie zahamowany, a w miejscu zahamowania przepływu ciśnienie wzrośnie w stosunku do ciśnienia statycznego osiągając wielkość p_c zwaną **ciśnieniem całkowitym**.

Przyrost ciśnienia na powierzchni płytki na skutek całkowitego zahamowania przepływu na płycie wynosi

$$p_d = \frac{\rho w^2}{2} \quad \text{i nazywany jest ciśnieniem dynamicznym } p_d.$$

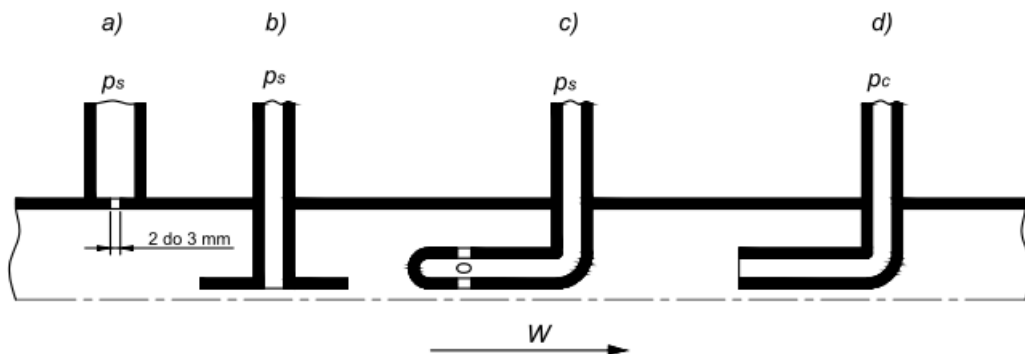
$$p_s + p_d = p_c$$

Analogiczne zjawisko wystąpi w przypadku ustawienia prostopadle do kierunku przepływu płynu otworu sondy pomiarowej. Na powierzchni czołowej otworu sondy występuje ciśnienie całkowite. Poprzez jednoczesny pomiar ciśnienia całkowitego i ciśnienia statycznego uzyskuje się bezpośredni pomiar ciśnienia dynamicznego zgodnie z równaniem $p_d = p_c - p_s$.

Przyrządy wykorzystujące tę zasadę to m. in. rurki Pitota i rurki Prandtla. Służą one przede wszystkim do pośredniego pomiaru prędkości strugi i wykorzystywane są m. in. w lotnictwie oraz w pomiarach prędkości gazu (powietrza) w kanałach wentylacyjnych.

Warunki, jakie muszą być spełnione przy pomiarze **ciśnienia statycznego**:

1. W płynach nieruchomych ciśnienie można przekazywać do przyrządu za pomocą rurki (przewodu) umieszczonej w dowolnym punkcie zbiornika, przy czym mierzone jest ciśnienie w danym punkcie. W przypadku cieczy należy uwzględnić ciśnienie hydrostatyczne.
2. W płynach przepływających ciśnienie statyczne odbiera się na ogół przy ściance przewodu przez wywierony otwór o średnicy 2-3 mm, przy czym krawędź otworu nie może posiadać nierówności lub rąbków powstałych po wierceniu (rys. 1a). W celu wyeliminowania wpływu prędkości płynu stosuje się króćce pomiarowe, ustawione w ten sposób, że wektor prędkości przepływu jest styczny do płaszczyzny wlotowej otworu impulsowego. Przy większych prędkościach stosuje się niekiedy rurki zakończone tzw. płytką Saire'a ustawioną równolegle do kierunku przepływu (rys. 1b), której zadaniem jest wyprostowanie strugi płynu. Znacznie lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie sondy w kształcie rurki zasklepionej, z otworami w powierzchni bocznej (rys. 1c), umieszczonej równolegle do kierunku przepływu. Taką samą sondą, lecz otwartą i bez otworów bocznych (rys. 1d) mierzy się **ciśnienie całkowite**.



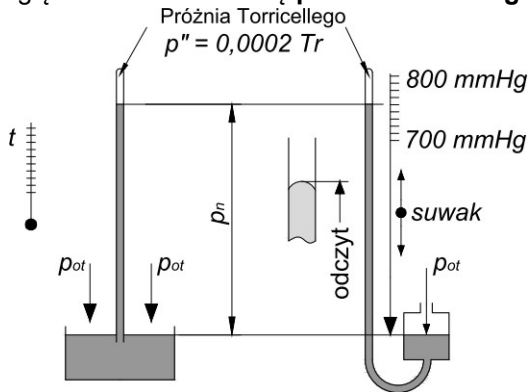
Rys. 1 Przykłady pomiaru ciśnienia statycznego i całkowitego

3. Ciśnienie bezwzględne i względne

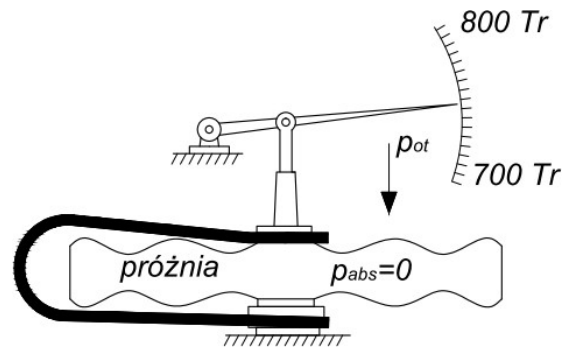
Wszystkie przyrządy służące do pomiaru ciśnień wskazują różnicę ciśnień działających po jednej i drugiej stronie elementu pomiarowego (elementu sprężystego, słupa cieczy).

3.1. Ciśnienie bezwzględne (absolutne) p_{abs}

Jeżeli po jednej stronie elementu pomiarowego panuje próżnia, wówczas przyrząd taki będzie wskazywał ciśnienie bezwzględne, czyli ciśnienie mierzone względem próżni. Tylko takimi przyrządami można zmierzyć **ciśnienie otoczenia (barometryczne) p_o** . Są to barometry rtęciowe (rys.2) lub stalowe – **aneroidy** (rys.3). Aneroid rejestrujący nazywamy barografem. Pustą przestrzeń nad meniskiem barometru rtęciowego wypełnia para cieczy manometrycznej o ciśnieniu nasycenia p'' . W przypadku, gdy cieczą manometryczną jest rtęć, ciśnienie nasycenia w temperaturze 0°C wynosi $p'' = 0,0002 \text{ Tr}$. Jest to bardzo niskie ciśnienie, bliskie zeru bezwzględnemu i nosi nazwę **próżni Torricellego**.



Rys. 2 Barometr rtęciowy



Rys. 3 Aneroid

3.2. Ciśnienie względne p_w (nadcisnienie p_n , podcisnienie p_p , ciśnienie różnicowe Δp)

W przypadku gdy po jednej stronie elementu pomiarowego panuje stałe ciśnienie otoczenia p_{ot} , wówczas przyrząd będzie wskazywał ciśnienie względne p_w czyli ciśnienie mierzone względem aktualnego ciśnienia otoczenia. W tym przypadku ciśnienie absolutne oblicza się jako sumę ciśnienia otoczenia p_{ot} i ciśnienia względnego p_w , przy czym ciśnienie otoczenia należy wyrazić w tych samych jednostkach, co zmierzone ciśnienie względne.

Jeżeli ciśnienie absolutne p_{abs} jest większe od ciśnienia otoczenia, wówczas ciśnienie względne wskazywane przez przyrząd nazywamy **nadcisnieniem p_n** (rys.4).

$$p_{abs} > p_{ot} \quad \text{to} \quad p_w = p_n \quad \text{i} \quad p_{abs} = p_{ot} + p_n$$

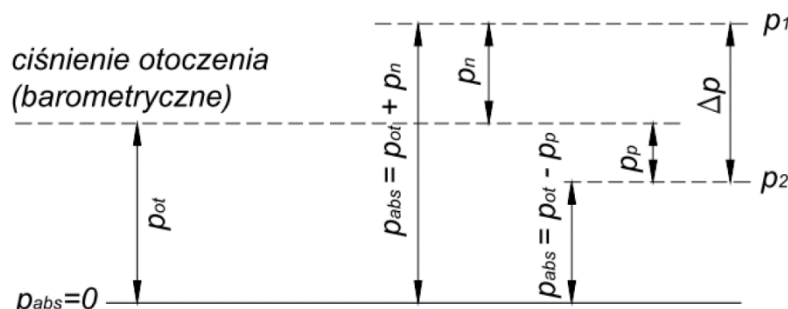
Jeżeli ciśnienie absolutne p_{abs} jest mniejsze od ciśnienia otoczenia p_{ot} , wówczas ciśnienie względne p_w wskazywane przez przyrząd nazywamy **podcisnieniem p_p** (rys.4).

$$p_{abs} < p_{ot} \quad \text{to} \quad p_w = -p_p \quad \text{I} \quad p_{abs} = p_{ot} - p_p$$

Wartość podcisnienia wyraża się często jako **procent próżni a_{pr}** :

$$a_{pr} = \frac{p_p}{p_{ot}} \cdot 100\%$$

Jeżeli po jednej stronie elementu pomiarowego panuje ciśnienie p_1 a po drugiej p_2 , wówczas przyrząd wskazuje **ciśnienie różnicowe Δp** (rys. 4)



Rys. 4 Zależności pomiędzy rodzajami mierzonych ciśnień

4. Klasyfikacja przyrządów do pomiaru ciśnienia

4.1. Klasyfikacja według rodzaju i zakresu mierzonego ciśnienia

- A. Manometry bezwzględne (absolutne) mierzące ciśnienie względem próżni bezwzględnej: barometry, aneroidy, skrócone wakuometry rtęciowe.
- B. Manometry i mikromanometry mierzące nadciśnienie względem ciśnienia barometrycznego.
- C. Próżniomierze (wakuometry) i ciążomierze mierzące podciśnienie względem ciśnienia barometrycznego.
- D. Manowakuometry mogące mierzyć zarówno nadciśnienie jak i podciśnienie.
- E. Manometry i mikromanometry różnicowe mierzące ciśnienie różnicowe.

Mikromanometrami i ciążomierzami nazywamy przyrządy służące do pomiaru ciśnienia rzędu kilku lub kilkudziesięciu mmH₂O.

4.2. Klasyfikacja według zasady działania

- A. Manometry hydrostatyczne (cieczowe) – pomiar opiera się na prawach hydrostatyki.
- B. Manometry hydrauliczne – pomiar opiera się na zasadzie hydraulicznej (prawo Pascala).
- C. Manometry sprężynowe – pomiar opiera się na zasadzie sprężystego odkształcenia elementu pomiarowego (rurki, membrany mieszka, itp.) pod wpływem działającego na niego ciśnienia.
- D. Manometry elektryczne – pomiar opiera się na zmianie własności elektrycznych czujnika (oporowego, piezoelektrycznego, pojemnościowego, indukcyjnego) pod wpływem działającego ciśnienia.

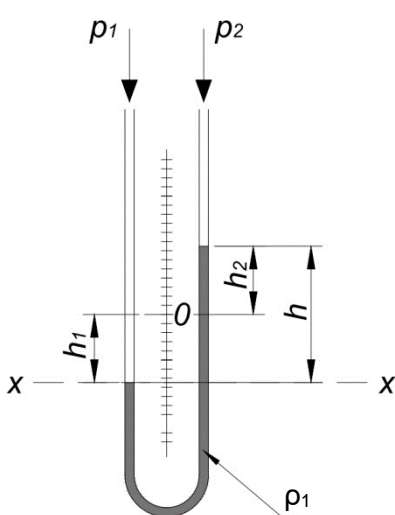
4.3. Klasyfikacja według przeznaczenia

- A. Manometry techniczne klasa 6 ÷ 1
- B. Manometry kontrolne i laboratoryjne klasa 1 ÷ 0,5
- C. Manometry laboratoryjne i wzorcowe klasa poniżej 0,5

5. Manometry i mikromanometry hydrostatyczne

5.1. Manometry cieczowe dwuramienne (U-rurki)

Ze względu na swoją prostotę budowy i techniki pomiaru, U-rurki znalazły najszersze zastosowanie zwłaszcza w pomiarach laboratoryjnych. Według prawa naczyń połączonych w obu gałęziach U-rurki ciśnienia na tych samych poziomach są jednakowe i niezależne od kształtu przekroju. W przypadku gdy nad cieczą manometryczną znajduje się gaz, ciężar jego można pominąć i wówczas dla poziomu $x-x$ (rys.5)



$$p_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h \quad ; \quad \Delta p = \rho \cdot g \cdot h$$

Czułość wskazań U-rurki (czułość przyrządu) jest tym większa im mniejsza jest gęstość cieczy manometrycznej ρ . Dla wody różnica ciśnień $\Delta h = 1 \text{ mmH}_2\text{O}$ powoduje wychylenie menisku $h = 1 \text{ mm}$. Gęstości stosowanych cieczy manometrycznych w temperaturze 20°C zestawiono w tabeli 1.

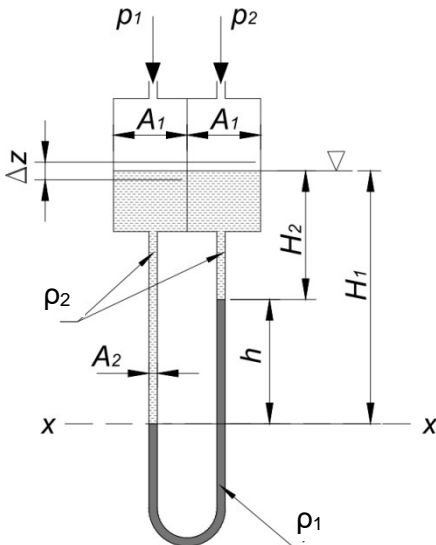
Tab. 1. Gęstości przykładowych cieczy manometrycznych

	ρ [kg/m ³]		ρ [kg/m ³]
Alkohol	792	Chloroform	1 493
Toulen	866	Bromek etylenu	2 172
Woda	998	Bromoform	2 903
Dwusiarczek węgla	1 263	Rtęć	13 546

Rys. 5 Manometr cieczowy dwuramienny, U-rurka.

Czułość U-rurki rtęciowej jest więc 13,6 razy mniejsza niż wodnej.

5.2. Mikromanometry hydrostatyczne



Rys. 6 Mikromanometr dwucieczkowy

Przyrządy służące do pomiaru małych ciśnień (rzędu setnych do kilkuset mmH₂O) zwane mikromanometrami powinny mieć możliwie duże przełożenie wskazań. W zwykłych U-rurkach cieczowych przez zastosowanie cieczy manometrycznej o najmniejszej gęstości (alkoholu) można zwiększyć przełożenie wskazań do wartości 1,26 co oznacza, że różnicy ciśnień 1 mmH₂O odpowiada wychylenie menisku 1,26 mm. Chcąc uzyskać większe przełożenie wskazań stosuje się inne rozwiązania.

5.2.1. U-rurka dwucieczkowa

U-rurkę (Rys. 6) zakończoną zbiorniczkami o dużym **polu przekroju** A_1 wypełnia się dwoma cieczami o różnych gęstościach (ρ_1, ρ_2). Ciecze nie mogą się mieszać ze sobą, tworząc na granicy zetknięcia wyraźnie widoczny menisk (np. woda i nafta). Zakładając duży stosunek pól przekroju zbiorniczków i ramion U-rurki A_1/A_2 możemy przyjąć, że $\Delta z \approx 0$ i poziom w zbiorniczkach przy pomiarze ciśnienia nie ulega zmianie. Z równowagi hydrostatycznej dla poziomu $x - x$

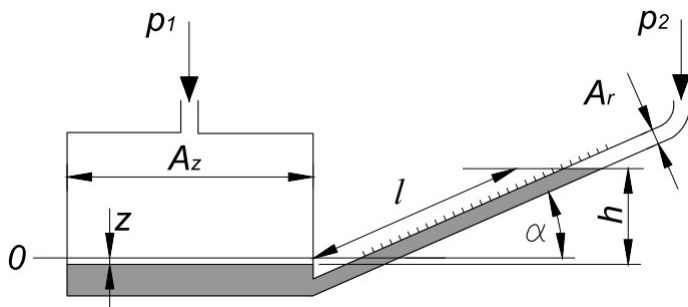
$$p_1 + H_1 \rho_2 g = p_2 + H_2 \rho_2 g + h \rho_1 g$$

$$p_1 - p_2 = \Delta p = h g (\rho_1 - \rho_2) = h g \Delta \rho$$

$$s = \frac{h}{\Delta p} = \frac{1}{g(\rho_1 - \rho_2)} = \frac{1}{g \Delta \rho}$$

W ten sposób stosując np. wodę i naftę ($\Delta \rho = 998 - 800 = 198 \text{ kg/m}^3$) uzyskuje się przełożenie wskazań względem pomiaru samą wodą na poziomie $s = 998/198 = 5,04$.

5.2.2. Mikromanometr naczyniowy z pochyłą rurką (Recknagla)



Rys. 7 Mikromanometr Recknagla

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h g \rho$$

$$h = z + l \sin \alpha; z = l \frac{A_r}{A_z}$$

$$\Delta p = l g \rho \left(\sin \alpha + \frac{A_r}{A_z} \right)$$

$$s = \frac{1}{\Delta p} = \frac{1}{g \rho} \frac{1}{\left(\sin \alpha + \frac{A_r}{A_z} \right)}$$

Jest to manometr naczyniowy, w którym rurkę można nachylać pod dowolnym kątem (Rys 7).

Zależnie od kąta pochylenia rurki α i gęstości cieczy manometrycznej (alkohol) ρ , można uzyskać przełożenie wskazań 10, 20 a nawet 50. Wartość mierzonej różnicy ciśnień $\Delta p = l / s$

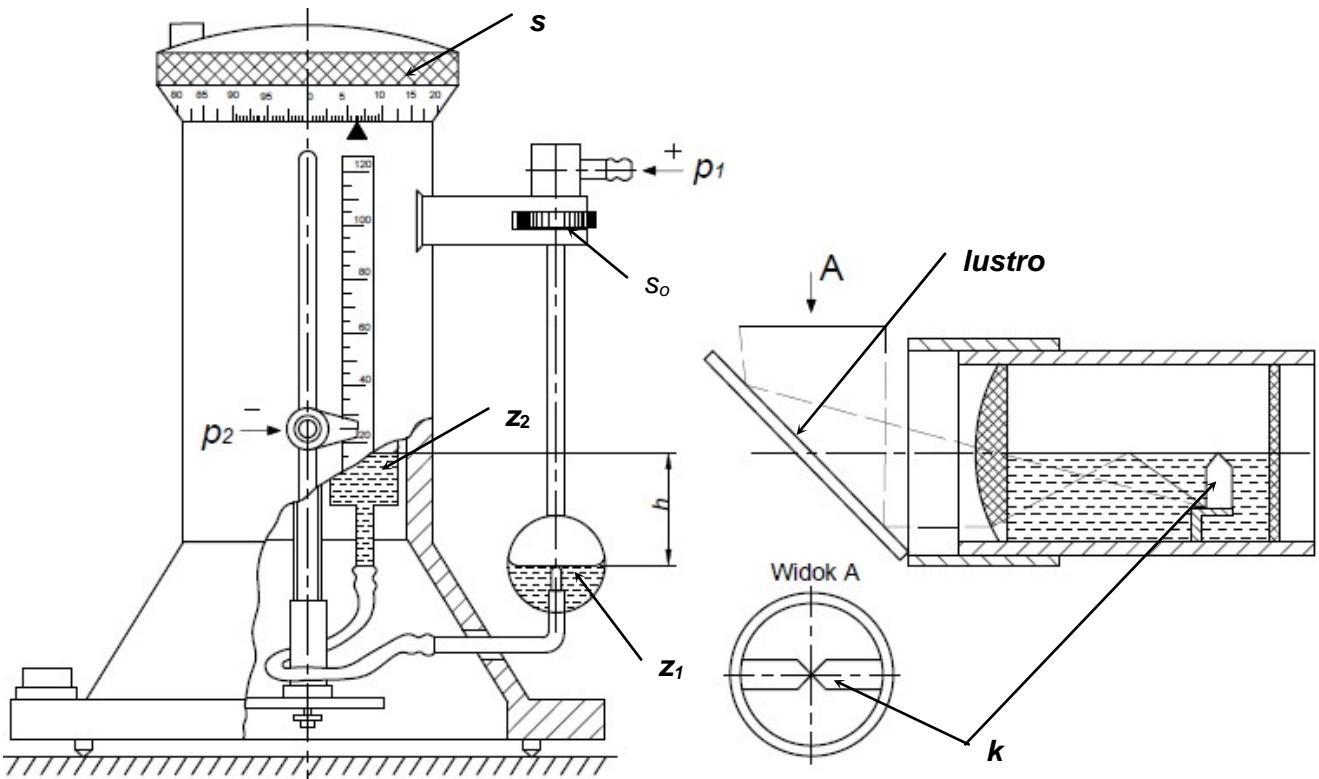
Przyrząd jest samocechowny, tzn. nie wymaga innego wzorcowego manometru do cechowania. Cechowanie ma na celu sprawdzenie czy przełożenie wskazań dla wszystkich odcinków podziałki jest stałe, czyli czy stały jest stosunek pól przekroju A_r/A_z (stały przekrój rurki) i kąt pochylenia α (czy oś rurki jest prostoliniowa).

Cechowanie przeprowadza się metodą dolewania znanej objętości cieczy ΔV .

Przyrząd ma charakter przyrządu laboratoryjnego i używany jest najczęściej do wzorcowania mikromanometrów technicznych i ciągomierzy.

5.2.3. Mikromanometr kompensacyjny zwany minimetrem (Askania)

Zakres pomiarowy 150 lub 250 mmH₂O, dokładność odczytu podziałki $\pm 0,01$ mm, dokładność pomiaru ciśnienia $\pm 0,5 \div \pm 0,2$ Pa.



Rys. 8 Mikromanometr kompensacyjny (Askania)

Dwa połączone ze sobą węzłem gumowym zbiorniki z_1 i z_2 , z których jeden (pomiarowy) z_2 można podnosić za pomocą śruby mikrometrycznej s , wypełnione są częściowo wodą destylowaną w ten sposób, żeby przy równych ciśnieniach w obu zbiornikach ($p_1 = p_2 = p_{ot}$) i umieszczeniu zbiornika z_2 na wysokości początku podziałki (0) poziom wody w zbiorniku z_1 znajdował się na wysokości ostrza kolca k . Nieznaczne przelanie wody przy napełnieniu lub zmniejszenie jej ilości na skutek odparowania można korygować przez podniesienie lub obniżenie (w niewielkim zakresie) zbiornika z_1 za pomocą nakrętki s_0 . Sprawdzenia i ewentualnego korygowania położenia zerowego minimetru należy dokonywać przed każdym pomiarem. Układ soczewek umożliwia obserwowanie w lustrze obrazu kolca i jego odbicia w wodzie. Poziom wody w zbiorniku z_1 znajduje się na wysokości ostrza kolca, jeżeli obrazy kolca i jego odbicia stykają się.

Pomiar różnicy ciśnień

Do końcówki „+” minimetru podłącza się przewód ciśnienia większego p_1 , do końcówki „-” ciśnienia mniejszego p_2 . Na skutek różnicy ciśnień $p_1 - p_2$ poziom wody w zbiorniku z_1 obniża się, natomiast w zbiorniku z_2 podnosi się, przy czym różnica poziomów h [mmH₂O] = $h_1 - h_2$.

Podnosząc za pomocą śruby mikrometrycznej s zbiornik z_2 kompensuje się podłączoną różnicą ciśnień doprowadzając do ponownego zetknięcia się kolca z lustrem wody. Odczytana na śrubie mikrometrycznej wysokość h podniesienia zbiornika z_2 jest wartością mierzonej różnicy ciśnień w mm H₂O.

Ze względu na kompensacyjną metodę pomiaru, stosowanie minimetru ogranicza się do pomiaru ciśnień stałych nie zmieniających się w czasie pomiaru. Używany jest on do wzorcowania innych mikromanometrów oraz do pomiaru ciśnienia statycznego.

6. Manometry hydrauliczne

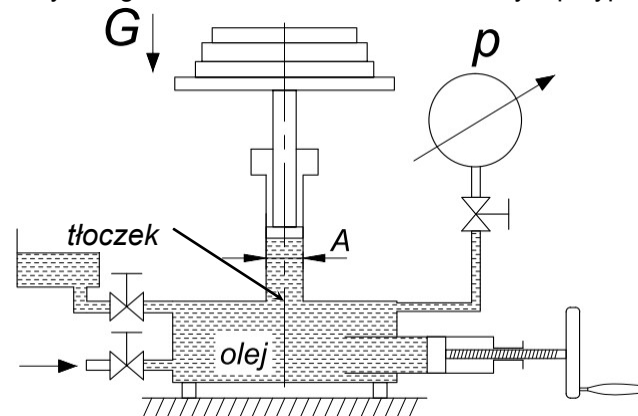
Działanie manometrów hydraulicznych opiera się na zasadzie równowagi hydraulicznej między ciśnieniem a siłą działającą na jednostkę pola powierzchni przegrody ruchomej (np. dzwonu, tłoka) wg równania definicyjnego

$$p = F/A$$

Manometry hydrauliczne różnią się od manometrów hydrostatycznych głównie tym, że równowaga sił zależy od pola powierzchni elementu ruchomego, przy czym na ogół w danym przyrządzie pole to ma wartość siły. Do tej grupy manometrów należą m. in.: waga dzwonowa, waga pierścieniowa, manometry tłokowe – prasy hydrauliczne.

6.1. Prasa hydrauliczna

Manometry tłokowe stosuje się do pomiaru wysokich ciśnień, przede wszystkim jednak do sprawdzania i statycznego cechowania manometrów. W tym przypadku noszą one nazwę **pras hydraulicznych** do



Rys. 9 Manometr tłokowy – prasa hydrauliczna

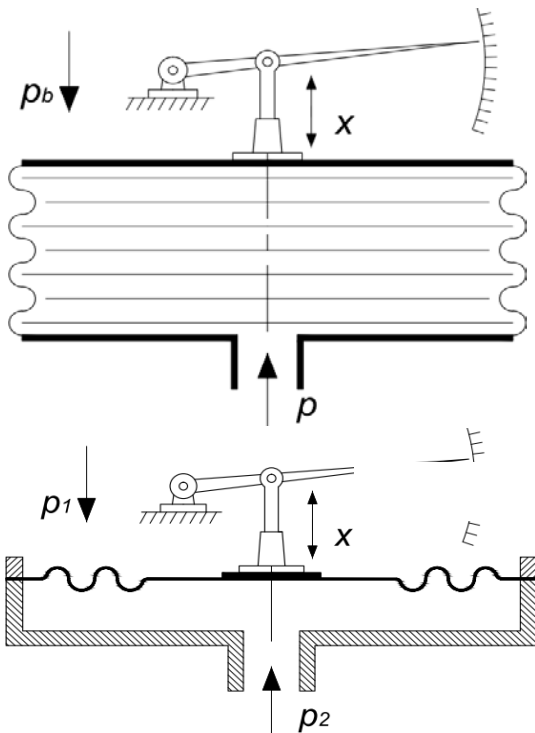
cechowania manometrów (Rys. 9). Istotą wykorzystania pras hydraulicznych jest **znajomość pola powierzchni czołowej A tłoczka oraz siły F** prostopadłej do powierzchni A.

Ciśnienie oleju wywołane w zamkniętym zbiorniku i działające na powierzchnię A tłoczka równoważone jest siłą F równą ciężarowi G będącego sumą ciężarów tłoczka, tłoczyśka oraz talerzy obciążających. Zmiana ilości talerzy powoduje zmianę całkowitej siły F . Przy stałej znanej powierzchni A , można łatwo określić ciśnienie p panujące w układzie. Jeżeli pole powierzchni tłoczka wynosi $A = 1\text{m}^2$ a wartość siły obciążającej $G = 1\text{N}$, to ciśnienie wywołane $p = 1\text{N/m}^2 = 1\text{Pa}$.

7. Manometry sprężynowe

Manometry sprężynowe działają na zasadzie zależności odkształcenia sprężystego od ciśnienia. W zależności od elementu ulegającego odkształceniu manometry sprężynowe dzieli się na:

1. Puszkowe (mieszkowe, syfonowe).
2. Przeponowe (membranowe).
3. Rurkowe.



Rys. 10 Manometry sprężynowe (od góry):
puszkowy, membranowy

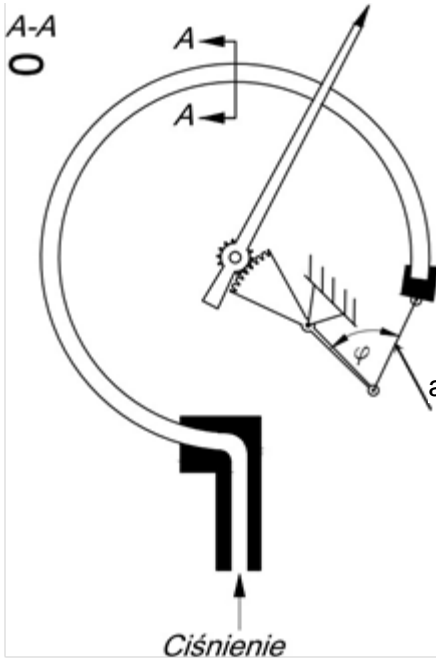
7.1. Manometry puszkowe (Rys. 10a)

Stosuje się je do pomiaru małych nad i podciśnień w zakresie do 1 bar. Odkształcenie $x_{\text{max}} = 8 \div 10\text{ mm}$, dokładność $\pm 2 \div 3\%$. Elementem sprężynującym może być puszka metalowa sfalowana na pobocznicę lub puszka posiadająca na jednej lub na obu powierzchniach czołowych membrany z wytłoczonymi współśrodkowo falami. Sfalowanie membrany ma na celu uzyskanie liniowej zależności odkształcenia membrany od ciśnienia.

7.2. Manometry membranowe (Rys. 10b)

Sfalowana metalowa membrana zaciśnięta między kołnierzami korpusu manometru, odkształca się pod wpływem ciśnienia. Odkształcenie to, nie przekraczające 2 mm, przenoszone jest na wskazówkę za pomocą stosunkowo dużej przekładni. Manometry metalowe stosuje się do pomiaru ciśnień nie przekraczających na ogół 10 bar (max. 30 bar), przede wszystkim jednak do **pomiaru podciśnień oraz ciśnienia różnicowego**. Dużą zaletą tego typu manometrów jest odporność na wstrząsy (mała masa membrany) oraz stosunkowo łatwa możliwość zabezpieczenia powierzchni wewnętrznych przed korodującym działaniem płynów, których ciśnienie się mierzy. Manometry membranowe wykonywane są w niskich i średnich klasach dokładności.

7.3. Manometry rurkowe (Rys. 12)



Elementem spiętrzającym jest tzw. rurka Bourdona, tj. metalowa rurka o spłaszczonym przekroju poprzecznym (A-A), zwinięta w kształcie łuku koła. Kąt zwinięcia rurki φ wnosi 270° , dla ciśnień wyższych od 100 bar – 180° . Jeżeli od manometru wymaga się dużej czułości wówczas stosuje się kąty zwinięcia rurki większe od 360° , przy czym ma ona wtedy postać **sprężyny spiralnej** (zwoje w jednej płaszczyźnie) lub sprężyny śrubowej. Jeden koniec rurki włutowany jest w króciec manometru, drugi zaś wolny zamknięty korkiem połączony jest za pośrednictwem cięgła (a) z przekładnią zębatą napędzającą wskazówkę. Jeżeli ciśnienie wewnątrz rurki jest większe od zewnętrznego wówczas przekrój poprzeczny odkształca się, stara się zbliżyć do kołowego, jednocześnie zaś rurka stara się rozwinąć, co powoduje przesunięcie swobodnego jej końca ($x_{\max} = 5\div 8$ mm). Jeśli ciśnienie w rurce Bourdona jest niższe od zewnętrznego, wtedy rurka zwiija się. Wykorzystuje się to w **próżniomierzach (wakuometrach) lub manowakuometrach**. Manometry rurkowe stosuje się do pomiaru ciśnień w bardzo szerokim zakresie począwszy od niskich ($0 \div 10$ bar), średnich (do 10 bar) do najwyższych (do 1000 MPa). W zależności od zakresu stosuje się różne materiały oraz przekroje poprzeczne rurek, jak również szczegóły konstrukcyjne manometrów.

Rys. 11 Manometr rurkowy

8. Manometry i przetworniki elektryczne

Są to manometry, które działają na zasadzie przetwarzania ciśnienia na znormalizowaną wielkość elektryczną, która jest mierzona za pomocą odpowiednich elektrycznych przyrządów pomiarowych wyposażonych w czytelny wskaźnik analogowy lub cyfrowy. Manometry zasadniczo składają się z trzech podstawowych elementów (Rys. 12):

- **czujnika**, przetwarzającego ciśnienie na inną wielkość fizyczną; np. odkształcenie membrany powodujące przesuwanie elementu zmieniającego jeden z parametrów (np. oporność lub pojemność) w elektrycznym układzie pomiarowym,
- **przetwornika**, przetwarzającego sygnał wyjściowy z czujnika na standaryzowaną wielkość elektryczną,
- **miernika**, współcześnie zazwyczaj elektronicznego, mierzącego i przetwarzającego sygnał elektryczny z przetwornika na zestaw znaków graficznych w postaci liczby i jednostki mierzonej wielkości fizycznej, tu ciśnienia. Manometry elektryczne są niemal niezastąpione przy pomiarach i **rejestracji ciśnień szybkozmiennych** oraz bardzo wysokich ciśnień i próżni.



Rys. 12 Schemat zasady działania manometru elektrycznego

Wszystkie trzy wymienione elementy stanowią typowy tor pomiarowy. Jeżeli występują **w jednej obudowie, nazywane są manometrami** lub szerzej ciśnieniomierzami.

Każdy z nich może być jednak osobnym elementem mającym odpowiedni zestaw wejść i wyjść zapewniających współpracę z innymi częściami większego systemu pomiarowego. Najczęściej w praktyce, spotyka się zestaw *czujnik-przetwornik* nazywany **przetwornikiem ciśnienia**. Jak wspomniano wcześniej, miernik może być elementem na stałe dołączonym do przetwornika ciśnienia, stanowiąc lokalny zestaw pomiarowy - **manometr**.

Przetworniki mogą być także elementem większego zestawu pomiarowego a sygnał pomiarowy ciśnienia, po przetworzeniu, wyświetlony na zbiorczym panelu lub ekranie. Przetworniki ciśnienia należą, oprócz termometrów, do najpowszechniej wykorzystywanych elementów w układach przemysłowej automatyki kontrolnej i pomiarowej. Systemy automatyki przemysłowej bazują zasadniczo na znormalizowanych

sygnałach analogowych, niosących informację o najróżniejszych parametrach fizycznych kontrolowanych procesów. Przyjęto następujące sygnały jako typowe dla pomiarów w automatyce:

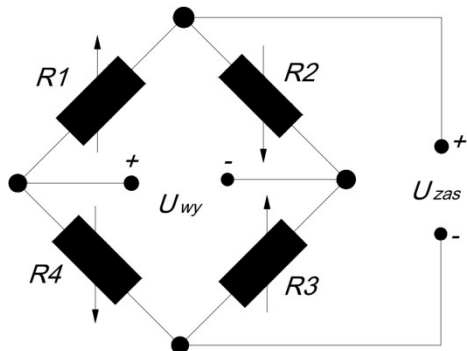
- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • napięciowe: <ul style="list-style-type: none"> ○ 0 - 5 V ○ 1 - 5 V ○ 0 - 10 V ○ 2 - 10 V | <ul style="list-style-type: none"> • prądowe: <ul style="list-style-type: none"> ○ 0 - 5 mA ○ 1 - 5 mA ○ 0 - 20 mA ○ 4 - 20 mA |
|--|---|

W praktyce najczęściej spotykany jest standard **4-20 mA**, oraz nieco rzadziej **0-10 V**.

Jak łatwo zauważyć porównując konstrukcję różnych czujników ciśnienia, elementem występującym w większości rozwiązań jest metalowa lub krzemowa membrana, która przetwarza ciśnienie na przesunięcie x . Znaczące różnice pojawiają się dopiero w układach przetwarzających przesunięcie x na wielkość elektryczną służącą do sterowania w układach automatyki albo do wyświetlenia wartości ciśnienia w postaci ciągu znaków liczbowych. Do najpopularniejszych przetworników ciśnienia stosowanych w przemyśle należą:

- przetworniki pojemnościowe,
- przetworniki piezorezystancyjne,
- przetworniki piezoelektryczne (pomiar ciśnień szybkozmiennych).

8.1. Przetworniki piezorezystancyjne (tensometryczne).

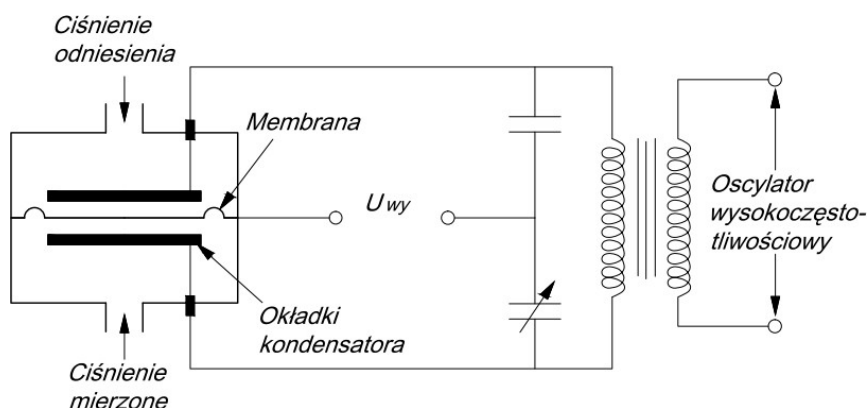


Rys. 13 Przetwornik tensometryczny

Przetworniki piezorezystancyjne (tensometryczne) wykorzystują efekt zmiany rezystancji materiału pod wpływem odkształcenia membrany na skutek działania ciśnienia. Na jednej z warstw powierzchni membrany wytrawiony jest zestaw piezorezystorów połączonych, w najprostszej wersji, w układzie mostka Wheatstone'a (Rys. 13). Identyczną zasadę działania mają czujniki tensometryczne, które zamiast półprzewodnikowych piezorezystorów w układzie mostka mają tensometry oporowe. Czulość piezorezystora jest nawet dziesięciokrotnie większa niż tensometru oporowego, dlatego piezorezystory częściej stosuje się jako czujniki w pomiarach sił oraz naprężeń statycznych i dynamicznych. Zwłaszcza gdy często pożądane jest, aby konstrukcja czujnika była jak najmniejsza. Odkształcenie membrany powoduje odkształcenie połączonych z nią piezorezystorów, zmieniając ich rezystancję. Dwa z nich (R1 i R3) umieszczone

równolegle do kierunku naprężenia są rozciągane i ich rezystancja rośnie. Dwa (R2 i R4) umieszczone prostopadłe do kierunku naprężenia są ściskane, a ich rezystancja maleje ze wzrostem ciśnienia. Mierzone napięcie nierównowagi mostka U_{wy} jest proporcjonalne do odkształcenia membrany czujnika i do zmiany ciśnienia działającego na membranę. Czujniki piezorezystancyjne cechują się dużą trwałością, szerokim zakresem ciśnień i małymi rozmiarami. Mają zastosowanie do rejestracji i pomiarów zarówno ciśnień statycznych jak i szybkozmiennych.

8.2. Przetworniki pojemnościowe.



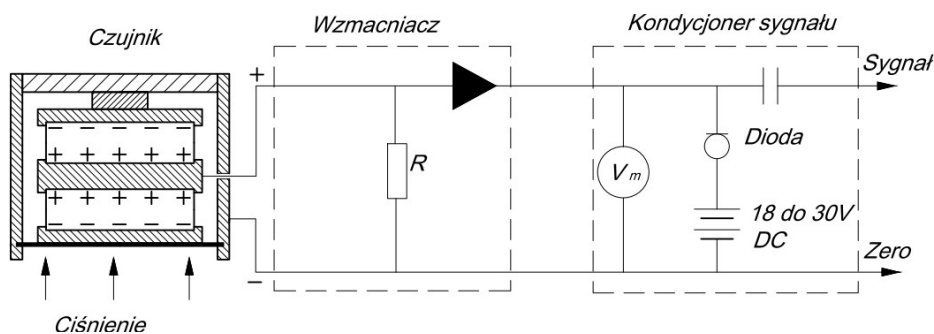
Rys. 14 Przetwornik pojemnościowy

Membrana metalowa lub kwarcowa pokryta warstwą metalu wraz z równoległe do niej zamocowanymi po przeciwnych stronach płytkami stałymi tworzy kondensator. Z jednej strony na membranę działa ciśnienie odniesienia, np. barometryczne, z drugiej zaś ciśnienie mierzone. W zależności od rodzaju ciśnienia odniesienia czujnik może mierzyć ciśnienie absolutne, nad- lub podciśnienie oraz ciśnienie

różnicowe. Pod wpływem zmiany ciśnienia membrana ugina się powodując zmianę pojemności kondensatora, która powoduje zmianę napięcia wyjściowego U_{wy} podłączonego do układu mostka. W zależności od rozwiązania mostek może być albo zrównoważony, albo niezrównoważony. W przypadku mostka zrównoważonego, po zmianie ciśnienia, a co za tym idzie odkształceniu membrany, układ dąży do wyzerowania napięcia U_{wy} poprzez zmianę pojemności regulowanego kondensatora. W układzie mostka niezrównoważonego mierzone ciśnienie jest proporcjonalne do stosunku napięcia wyjściowego U_{wy} do napięcia zasilania.

Popularne są również **przetworniki pojemnościowe z jedną ruchomą okładką kondensatora**. Druga okładka jest nieruchoma. W tych rozwiązaniach okładka ruchoma osadzona jest na membranie i jej przesunięcie jest bezpośrednią funkcją zmiany ciśnienia. Przesunięcie membrany powoduje zmianę pojemności kondensatora. Zmiana pojemności jest przetwarzana na sygnał wyjściowy prądowy, albo napięciowy.

8.3. Przetworniki piezoelektryczne.



Rys. 15 Przetwornik piezoelektryczny

Wykorzystuje się w tym wypadku zjawisko piezoelektryczne niektórych kryształów (kwarc, turmalin, sól Seignette'a) polegające na powstawaniu różnych ładunków elektrycznych, ujemnych i dodatnich, na płaszczyznach płytek wyciętych prostopadle do osi elektrycznych kryształów. Ładunki te są proporcjonalne do siły działającej na

powierzchni płytek $Q = \delta F$. Płytki kryształów umieszcza się w odpowiedniej obudowie (Rys. 15) w ten sposób, by na powierzchniach skierowanych ku sobie powstawały ładunki jednoimienne. Powstała różnica potencjałów jest następnie wzmacniania i kondycjonowana w układach elektronicznych.

Czujniki piezoelektryczne, ze względu na niską pojemność elektryczną płytki pomiarowej w połączeniu ze skończoną opornością układu pomiarowego, nadają się **jedynie do pomiarów ciśnień szybkozmiennych**, a w szczególności zmian ciśnienia w silnikach i maszynach tłokowych. Cechują się bardzo dużą trwałością, szerokim zakresem ciśnień i małymi rozmiarami.

8.4. Przetworniki działające na zasadzie zmian przewodności cieplnej gazów pod wpływem ciśnienia

Drucik platynowy zamieszczony w osi cylindrycznego kanału, w którym panuje mierzone ciśnienie, zasilany jest prądem o stałym natężeniu. Temperatura drucika, a więc i jego opór zwiększa się w przypadku gorszych warunków odprowadzenia ciepła do ścianek kanału, czyli w przypadku zmniejszenia się przewodności cieplnej gazu. Przewodność cieplna gazu w końcu zależy od jego gęstości, a więc i ciśnienia. Drucik platynowy stanowi jedną z gałęzi mostka Wheatstone'a. Na identycznej zasadzie działają tzw. próżniomierze Piraniego do pomiaru wysokich próżni.

8.2. Przetworniki oporowe

Działanie ich oparte jest na zasadzie zmian oporu elektrycznego przewodnika pod wpływem ciśnienia $\Delta R = kR_p$, gdzie k – ciśnieniowy współczynnik oporności, którego wartość zależy od materiału opornika. Stosuje się manganin, dla którego k jest dodatni i wynosi około 0,25 1/Pa. Ze względu na małą wartość współczynnika k , czujniki te stosuje się **do pomiaru bardzo wysokich ciśnień rzędu tysięcy bar**.

8.5. Przetworniki indukcyjne

Zmianę impulsów ciśnienia na impulsy elektryczne można również osiągnąć przez zmianę indukcyjności obwodu zasilanego prądem zmiennym. Cewka z żelaznym rdzeniem zasilana jest prądem zmiennym o wysokiej i stałej częstotliwości. Gdy na kotwicę umieszczoną na sprężystej membranie działa ciśnienie, wtedy szerokość szczeliny między kotwicą a rdzeniem cewki ulegnie zmianie, a więc zmieni się też natężenie prądu w obwodzie pomiarowym.

9. Sprawdzanie i wzorcowanie manometrów

W większości przyrządów cechowanie wskaźników wyznacza się doświadczalnie, w związku z czym należy sprawdzić prawidłowość wskazań tych przyrządów bezpośrednio po ich wykonaniu oraz okresowo w miarę upływu czasu ich użytkowania. Sprawdzanie wskazań dokonuje się przez porównanie ze wskazaniami przyrządów wzorcowych **samocechawalnych** lub przyrządów wzorcowych **o wyższej klasie dokładności**.

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO

1.1 Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z przyrządami oraz metodami służącymi do pomiaru zarówno małych ciśnień (do kilku kPa) jak i ciśnień dużych, rzędu kilkunastu MPa. Stąd też ćwiczenie jest podzielone na dwie części, obejmujące te zagadnienia.

1.2 Stanowisko laboratoryjne i opis przyrządów pomiarowych

Na stanowisku laboratoryjnym znajdują się następujące przyrządy pomiarowe:

- manometr cieczowy dwuramienny (U-rurka) z wodą,
- manometr cieczowy dwuramienny (U-rurka) z alkoholem,
- manometr cieczowy z rurką pochyłą (manometr Recknagla),
- mikromanometr kompensacyjny,
- manometr z czujnikiem piezoelektrycznym.

1.3 Tok postępowania podczas badania

1. Źródłem ciśnienia wentylator, zamontowany w ciągu kanału rurociągu. Kanał jest połączony giętką rurką z przyrządami pomiarowymi.
2. Wszystkie manometry należy podłączyć tak, aby mierzyły tą samą różnicę ciśnień (jednym z ciśnień może być ciśnienie atmosferyczne).
3. Wypoziomować oraz tam, gdzie to konieczne, wyzerować manometry.
4. Po uruchomieniu wentylatora należy najpierw dokonać wyzerowania manometru kompensacyjnego, a następnie dokonać jego odczytu i odczytu pozostałych przyrządów.
5. Dokonać odczytów wskazań manometrów dla kilku punktów pomiarowych.
6. Dokonać odczytu wskazań U rurki z alkoholem mierzącej ciśnienia dynamiczne i statyczne w rurociągu.
7. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli pomiarowej 1.

Tab.1 Tabela pomiarowa.

Rodzaj ciśnieniomierza	Wskazania przyrządów (mm słupa cieczy manometrycznej lub Pa)						
	1	2	3	4	5	6	7
U-rurka z wodą							
U-rurka z alkoholem							
Manometr Recknagla							
Mikromanometr kompensacyjny							
Manometr z czujnikiem piezoelektrycznym							

1.4 Analiza wyników badań

Z uwagi na dużą dokładność, manometrem wzorcowym dla prowadzonych pomiarów jest manometr kompensacyjny. Na podstawie prowadzonych badań zostanie określony błąd bezwzględny oraz względny dla pozostałych manometrów.

W pierwszym kroku należy przeliczyć wskazania przyrządów na wartość ciśnienia w paskalach. Jako przyspieszenie ziemskie przyjmujemy $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Wyniki przeliczeń notujemy w tabeli 2:

Laboratorium Termodynamiki Pomiar ciśnienia

Tab.2 Tabela z wartościami zmierzonych ciśnień

Rodzaj ciśnieniomierza	Wskazania przyrządów przeliczone na Pa						
	1	2	3	4	5	6	7
U-rurka z wodą							
U-rurka z alkoholem							
Manometr Recknagla							
Mikromanometr kompensacyjny							
Manometr z czujnikiem piezoelektrycznym							

Następnie przechodzimy do obliczenia bezwzględnych błędów pomiaru dla badanych manometrów: gdzie:

$$\Delta p = |p - p_{ref}|$$

p_{ref} – wskazanie manometru wzorcowego, [Pa]

p – wskazanie manometru badanego, [Pa].

Względny błąd pomiaru badanego manometru:

$$\delta_p = \frac{|p - p_{ref}|}{|p_{ref}|} [\%]$$

Tab. 3 Tabela z wartościami błędów względnych

Rodzaj ciśnieniomierza	Względny błąd pomiaru δ_p						
	1	2	3	4	5	6	7
U-rurka z wodą							
U-rurka z alkoholem							
Manometr Recknagla							
Manometr z czujnikiem piezoelektrycznym							

Tab. 4 Tabela z pomiarami ciśnień statycznych i dynamicznych w rurociągu

Rodzaj ciśnienia:	Wskazania przyrządów [mm H ₂ O]		
	1	2	3
Statyczne			
Całkowite			
Dynamiczne			

Zmierzone wartości ciśnień całkowitych i statycznych pozwalają na obliczenie ciśnienia dynamicznego. Znając ciśnienie dynamiczne przepływu, możemy wyznaczyć prędkość przepływającego powietrza w kanale:

$$p_d = \frac{\rho w^2}{2}, \quad \text{stąd:} \quad w = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$$

Dla warunków standardowych (15 °C i 101 325,25 Pa), gęstość powietrza wynosi 1,225 kg/m³.

Tab. 5 Tabela z wynikami obliczeń ciśnienia dynamicznego i prędkości przepływu w rurociągu.

Wartość		Wyniki		
		1	2	3
Ciśnienie dynamiczne	[Pa]			
Prędkość przepływu	[m/s]			

2. POMIAR HISTEREZY MANOMETRU

2.1 Cel i zakres ćwiczenia

Druga część ćwiczenia obejmuje zapoznanie się z przyrządami oraz metodami służącymi do pomiaru dużych ciśnień, rzędu megapaskali. Zakres ćwiczenia obejmuje sprawdzenie dokładności oraz histerezy manometru sprężystego (z rurką Bourdona) na prasie hydraulicznej z użyciem zintegrowanego przetwornika ciśnienia.

2.2 Stanowisko laboratoryjne

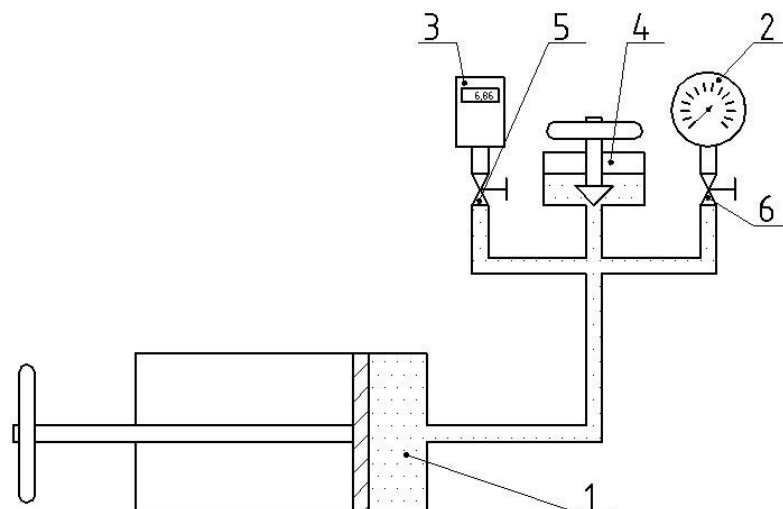


Stanowisko przedstawione na rysunku 4 przeznaczone jest do sprawdzania dokładności i histerezy manometrów z wykorzystaniem zintegrowanego (tensometrycznego) przetwornika ciśnienia.

Rys. 1 Stanowisko do sprawdzania dokładności i histerezy manometrów

Elementy składowe stanowiska to:

1. hydrauliczny sprawdzian manometrów, zakres: $0 \div 50$ MPa,
2. zintegrowany tensometryczny przetwornik ciśnienia; typ AR 057-C, zakres: $0 \div 20$ MPa, klasa dokładności: 0,5,
3. manometr badany, zakres: $0 \div 16$ MPa, klasa dokładności: 2,5.



Rys. 2. Schemat stanowiska do sprawdzania dokładności i histerezy manometrów; 1 – prasa hydrauliczna, 2 – manometr badany, 3 – zintegrowany przetwornik ciśnienia (wzorcowy), 4 – zbiornik oleju, 5, 6 – zawory odcinające

2.3 Tok postępowania podczas badania

1. Przed założeniem przyrządów do pomiaru ciśnienia należy dokładnie odpowietrzyć układ (czynność wykonana wcześniej).
2. Należy odkręcić zawory odcinające 5, 6 i zakręcić zawór odcinający zbiornika 4.
3. Kręcąc śrubą prasy hydraulicznej 1 w prawo (zgodnie z ruchem wskazówek zegara), wytworzyć ciśnienie w układzie i dokonać odczytu ciśnienia (na manometrze badanym 2 i wzorcowym 3) po uprzednim lekkim opukaniu palcem obudowy manometru wskazówkowego 2.
4. Czynność z punktu 3. wykonać dla wyznaczonych punktów pomiarowych w całym zakresie manometru badanego/wzorcowego.
5. Po osiągnięciu ostatniego punktu pomiarowego (maksymalna wartość ciśnienia manometru badanego/wzorcowego) dokonać pomiarów przy zmniejszającym się ciśnieniu, kręcąc śrubą prasy hydraulicznej 1 w lewo (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Pomiar należy wykonać dla tych samych ciśnień, co przy zwiększaniu ciśnienia.

2.4 Badanie histerezy manometru

Temperatura odniesienia badań: 20°C. Dla badań ciśnieniomierzy klasy 1; 1,6; 2,5; oraz 4, temperatura odniesienia może odbiegać o $\pm 5^\circ\text{C}$. Dla pozostałych, dokładniejszych klas – o $\pm 2^\circ\text{C}$.

Badanie możemy wykonywać w dwóch wariantach:

1. porównanie wskazań ciśnieniomierza badanego i wzorcowego według wskazań ustawianych na przyrządzie badanym,
2. porównanie wskazań ciśnieniomierza badanego i wzorcowego według wskazań ustawianych na przyrządzie wzorcowym.

Wygodniejsze jest porównywanie wskazań manometrów według wskazań ustawianych na ciśnieniomierzu badanym. Unikamy w ten sposób konieczności interpolacji wskazań manometrów wskazówkowych. Według normy, minimalna liczba punktów sprawdzenia dla manometrów klasy 1, 1,6 oraz 2,5 wynosi pięć punktów.

Tabela 6 jest przykładową tabelą pomiarowo-obliczeniową, służącą do gromadzenia danych pomiarowych i wyników obliczeń.

Tab.6. Tabela do gromadzenia wyników badania według wskazań ustawianych na manometrze badanym

Lp.	Wskazanie manometru badanego p	Wskazanie manometru wzorcowego		Bezwzględne błędy pomiaru manometru badanego		
		p_{ros}	p_{mal}	Δp_{ros}	Δp_{mal}	Δp_{hist}
[MPa]						
1						
2						
3						
4						
5						

Bezwzględny błąd pomiaru badanego manometru przy wzrastającym ciśnieniu:

$$\Delta p_{ros} = |p - p_{ros}|$$

gdzie:

p_{ros} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy rosnącym ciśnieniu,
 p – wskazanie manometru badanego (wzorcowego).

Bezwzględny błąd pomiaru badanego manometru przy malejącym ciśnieniu:

$$\Delta p_{mal} = |p - p_{mal}|$$

gdzie:

p_{mal} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy malejącym ciśnieniu,
 p – wskazanie manometru badanego (wzorcowego).

Histereza pomiarowa:

$$\Delta p_{hist} = |p_{mal} - p_{ros}|$$

gdzie:

p_{mal} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy malejącym ciśnieniu,
 p_{ros} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy rosnącym ciśnieniu.

Uwaga!

Pozycje w nawiasach dotyczą badania według wskazań ustawianych na manometrze wzorcowym.

3. POMIAR CIŚNIENIA ATMOSFERYCZNEGO

W tej części ćwiczenia należy dokonać odczytu ciśnienia atmosferycznego mierzonego za pomocą dwóch przyrządów. Pierwszy z nich, to barometr okrętowy BO-863 "Horn" znajdujący się na ścianie pomieszczenia laboratorium. Podczas odczytu należy zwrócić na jednostki fizyczne, ponieważ przyrząd posiada dwie skale pomiarowe.

Drugi przyrząd to podobnej konstrukcji barometr laboratoryjny.

Barometr 1:

Barometr 2:

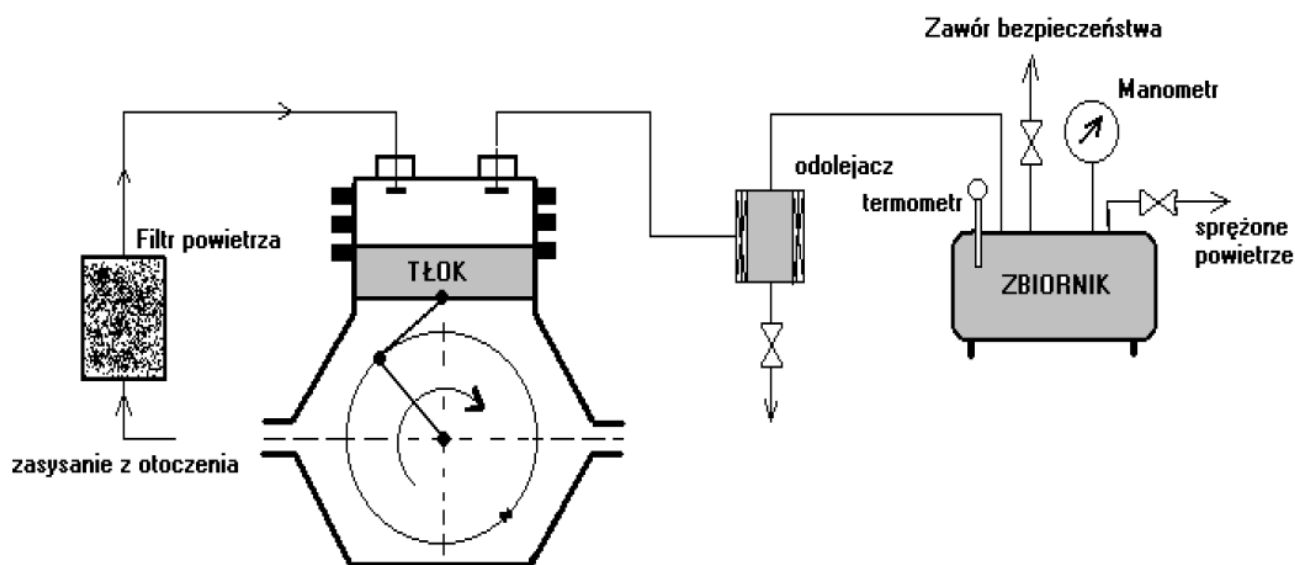
4. POMIAR CIŚNIENIA STATYCZNEGO W ZBIORNIKU

Ten etap ćwiczenia polega na pomiarze ciśnienia statycznego oraz temperatury w zbiorniku. Zmierzone wartości pozwalają na obliczenie masy powietrza znajdującej się w zbiorniku przed i po procesie sprężania. Aby obliczyć masę powietrza konieczne jest zastosowanie równania stanu gazu doskonałego.

$$p_1V = M_1RT_1 ; p_2V = M_2RT_2$$

$$M_1 = \frac{p_1V}{RT_1} ; M_2 = \frac{p_2V}{RT_2}$$

$$\Delta M = M_2 - M_1$$



Rys. 3 Schemat badanej sprężarki [Instrukcja ćwiczenia: Badanie sprężarki tłokowej; Maszyny Przepływowe; KSEiUOS].

Podczas ćwiczenia zostaną zmierzone nadciśnienia w zbiorniku oraz temperatury przed i po sprężaniu. Objętość zbiornika wymagana w obliczeniach wynosi $V = 135 \text{ l}$.

Tab. 7 Tabela wyników pomiaru masy sprężonego powietrza

Parametr		Wartości zmierzone	Wartości bezwzględne, w jednostkach SI
Ciśnienie w zbiorniku – pocz.	p_1	kG/cm ²	
Ciśnienie w zbiorniku – koń.	p_2	kG/cm ²	
Temperatura w zbiorniku – pocz.	T_1	°C	
Temperatura w zbiorniku – koń.	T_2	°C	
Objętość zbiornika	V	135 l	
Masa początkowa powietrza	M_1	---	
Masa końcowa powietrza	M_2	---	
Masa sprężonego powietrza	ΔM	---	

5. WYKONANIE SPRAWOZDANIA I ZALICZENIE ĆWICZENIA

5.1 Sprawozdanie

Sprawozdanie należy przygotować na papierze formatu A4. W sprawozdaniu należy zamieścić kolejno, zgodnie z opisem zawartym w niniejszej instrukcji:

1. Tabelkę tytułową,
2. Cel ćwiczenia,
3. Opis przeprowadzonych badań dla kolejnych punktów, pomiary i dodatkowe obliczenia zgodnie z niniejszą instrukcją, tj.:
 - 3.1 Pomiar małych ciśnień oraz ciśnienia statycznego i dynamicznego wg p. 1; tabele 1 - 5 wraz z obliczeniami.
 - 3.2 Pomiar histerezy manometru wg p. 2 oraz dodatkowo wykres zależności Δp_{hist} w funkcji ciśnienia manometru badanego lub wzorcowego.
 - 3.3 Pomiar ciśnienia atmosferycznego według punktu 3.
 - 3.4 Pomiar ciśnienia statycznego w zbiorniku wg. punktu 4, wraz z tabelą 7

Wykresy można przygotować na papierze milimetrowym lub komputerowo (w arkuszu kalkulacyjnym).

Tabelkę tytułową należy wykonać i czytelnie wypełnić wg poniższego wzoru. Wielkość tabelki jest orientacyjna.

Termodynamika - Laboratorium		
Pomiar ciśnienia		
Nazwisko, Imię, Nr albumu	Data wyk.	Grupa nr

4.2 Zagadnienia do kolokwium zaliczeniowego po wykonaniu ćwiczenia

Warunkiem zaliczenia ćwiczenia jest zaliczenie sprawozdania oraz zaliczenie kolokwium z oceną pozytywną. Poniżej podano zagadnienia do kolokwium zaliczeniowego:

1. Ciśnienie: definicja i jednostki ciśnienia, przeliczanie różnych jednostek ciśnienia. Poziomy odniesienia w pomiarach ciśnienia (ciśnienie względne, bezwzględne, manometryczne, absolutne).
2. Budowa i zasada działania manometru cieczowego dwuramiennego (U-rurki). Wyprowadzenie wzoru na mierzoną różnicę ciśnień.
3. Budowa i zasada działania manometru cieczowego jednoramiennego. Wyprowadzenie wzoru na mierzoną różnicę ciśnień.
4. Budowa i zasada działania manometru cieczowego jednoramiennego z pochyłym ramieniem (Recknagla). Wyprowadzenie wzoru na mierzoną różnicę ciśnień.
5. Omów i opisz zjawisko histerezy w manometrach. Na czym ono polega i gdzie występuje?

4.3 Literatura

- Piotrowski J. Pomiary, czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego. WNT, wyd. 2, Warszawa, 2015
- Fodemski T. Pomiary cieplne część 1 Podstawowe pomiary cieplne. WNT, wyd. 3, Warszawa, 2000
- Bakinowska K. Pomiary cieplne. Cz. 1, Podstawowe pomiary cieplne. WNT, Warszawa, 1993
- *Rysunki zaczerpnięto z:* Komecki T. Pomiar ciśnienia, w: Kotlewski F., Mieszkowski M. Pomiary w technice cieplnej. wyd. 2, Warszawa: WNT, 1974