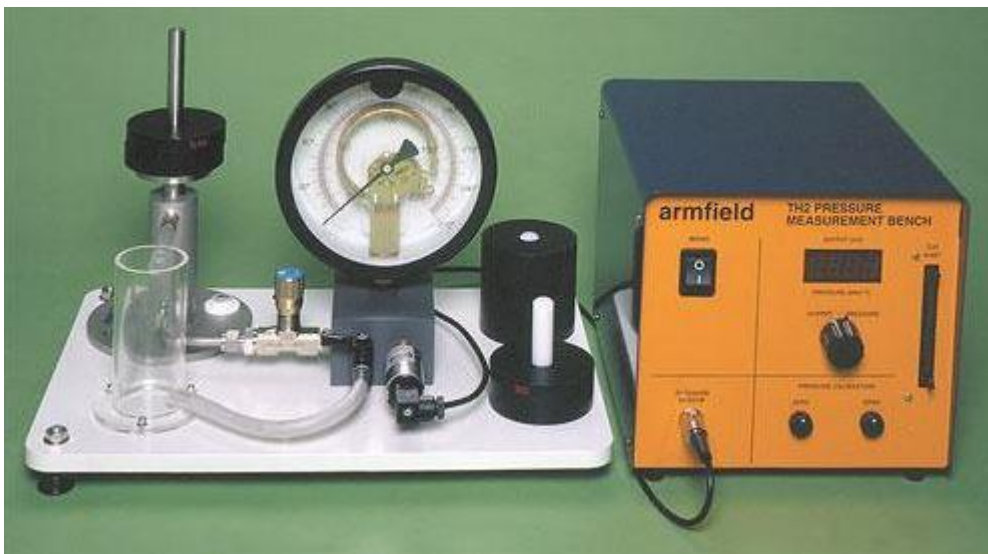
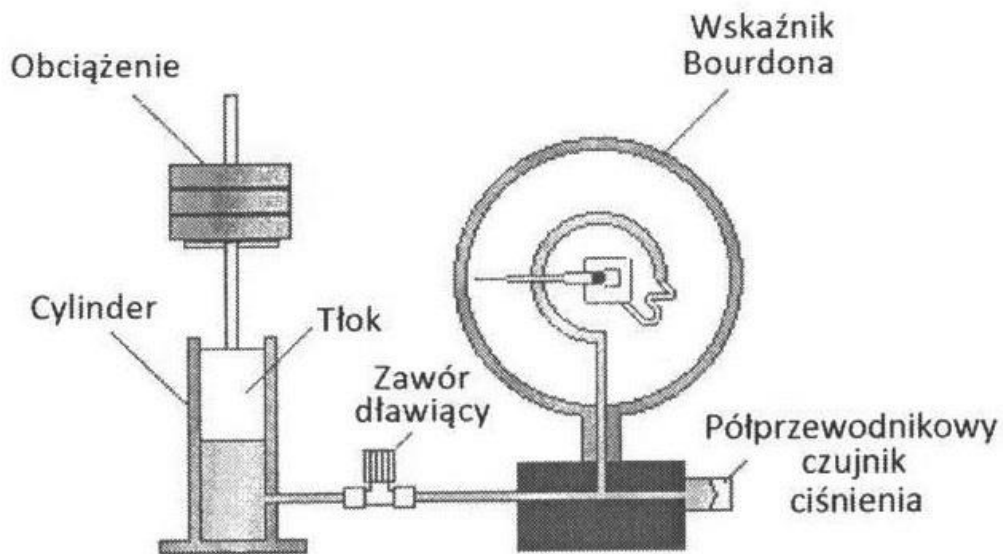


14

Pomiar ciśnienia oraz kalibracja



Koncepcja kalibracji oraz pomiaru ciśnienia



Cele:

Zamienić dowolną skalę napięcia wyjściowego z czujnika ciśnienia na jednostki inżynierskie. Kalibracja półprzewodnikowego czujnika ciśnienia.

Metoda:

Użyj kalibratora obciążnikowego, aby otrzymać znane ciśnienia w cieczy.

Teoria:

Pomiar ciśnienia

Podstawowe pojęcia

Ciśnienie, razem z temperaturą i objętością, określa stan termodynamiczny cieczy lub gazu. Jest on związany z ruchem drobin i ich energią kinetyczną. Ciśnienie odczuwane jest na ściance kanału zbiornika lub na powierzchni lustra wody. W myśl kinetyczno-molekularnej teorii płynów ciśnienie działające na ściankę jest wynikiem jej nieustannego bombardowania przez cząsteczki. Siła oddziaływania na ściankę zależy od prędkości i masy drobin i ich ilości – koncentracji. Jeśli rośnie temperatura w zbiorniku związana z energią kinetyczną drobin, to rośnie też ciśnienie. Jeśli objętość gazu ulegnie zmianie, na przykład w układzie cylinder-tłok, to rośnie koncentracja drobin i stąd rośnie też ciśnienie. Ciśnienie najlepiej zdefiniować odnosząc je do powierzchni, na przykład ścianki. Jeśli na daną powierzchnię A działa siła oddziaływania F , to ciśnienie jest definiowane jako stosunek

$$p = \frac{F}{A} \quad \frac{N}{m^2} \quad (1)$$

czyli jest to siła jaka działa na jednostkę powierzchni 1m^2 . W mechanice nazywa się to naprężeniem normalnym ściskającym – $p = \sigma$. Przechodząc do punktu w przestrzeni ciśnienie lokalne wynika z granicy jeśli $A \rightarrow 0$

$$p = \sigma = \lim \frac{F}{A}. \quad (2)$$

Ciśnienie w ogólnym przypadku jest funkcją położenia

$$P = f(x, y, z). \quad (3)$$

Tylko w przypadku gazu pod dużym ciśnieniem, gdzie możliwe jest do pominięcia ciśnienie hydrostatyczne, można uznać, że ciśnienie w zbiorniku jest takie samo w każdym punkcie, co jest treścią prawa Pascala.

W mechanice płynów wykazuje się również, że w danym punkcie płynu (przestrzeni), znajdującego się w stanie spoczynku ciśnienie jest jednakowe we wszystkich kierunkach.

Wielkość ciśnienia zauważamy przy wypływie płynu przez otwór w ścianie zbiornika lub rurociągu. Im wyższe ciśnienie z tym większą prędkością wypływa płyn.

Z ciśnieniem związane są różne pojęcia. Już poprzednio wymieniliśmy ciśnienie hydrostatyczne wyrażone wzorem

$$p = g \rho h \quad (4)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie w m/s^2

ρ – gęstość cieczy lub gazu w kg/m^3

h – wysokość słupa płynu w m.

Ponieważ wysokość ciśnienia jest wprost proporcjonalna do wysokości h , stąd wysokość tę traktuje się jako miarę ciśnienia.

Jeśli w rurociągu płyn jest w stanie spoczynku, to mówimy o ciśnieniu statycznym p . natomiast jeśli płyn jest w ruchu, to dochodzi dodatkowe ciśnienie zwane dynamicznym

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (5)$$

Sumując obydwie ciśnienia otrzymuje się ciśnienie całkowite

$$p_c = p + p_d. \quad (6)$$

Przy czym gęstość ρ we wzorze 2.5 wylicza się z równania Clapeyrona

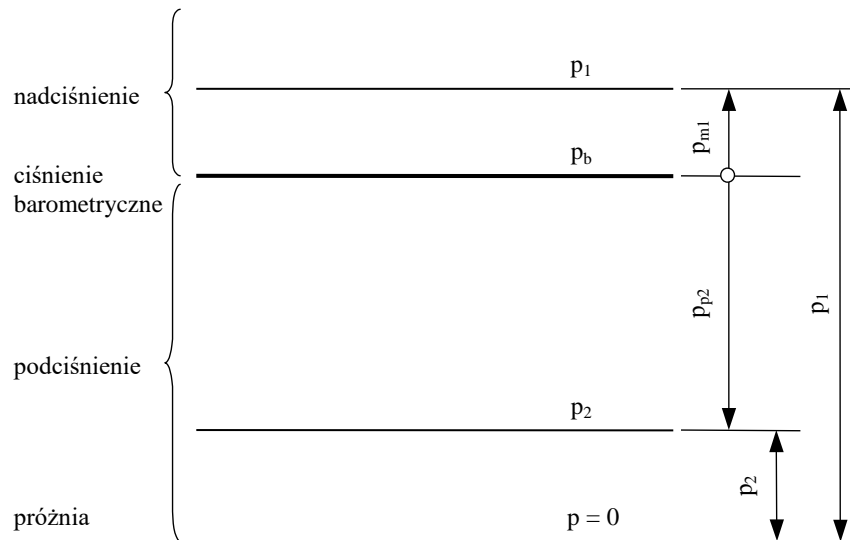
$$p_s = \rho R T \quad (7)$$

gdzie R jest indywidualną stałą danego gazu.

Dalsze pojęcia ciśnienia związane są ze sposobem pomiaru. Gdyby mierzyć ciśnienie względem zera absolutnego, to ciśnienie nazywa się absolutnym. Takie ciśnienie mierzy barometr o czym powiemy dalej. Na ogół jednak przyrządy do pomiaru ciśnienia zwane manometrami mierzą ciśnienie względem ciśnienia

barometrycznego p_b . Mierzone ciśnienie może być mniejsze lub większe od ciśnienia barometrycznego. Ciśnienia te nazywamy manometrycznymi a dla odróżnienia czy są mniejsze czy większe od ciśnienia otoczenia używa się pojęcia podciśnienie p_p lub nadciśnienia p_n . Relacje te pokazuje rys. 1. Do równań termodynamiki i mechaniki płynów wstawia się wartość ciśnienia absolutnego p . Między poszczególnymi ciśnieniami istnieją zależności

$$\begin{aligned} p &= p_b + p_n \\ p &= p_b - p_p. \end{aligned} \quad (7)$$



Rys. 1. Sposoby określania ciśnienia

Chcąc obliczyć ciśnienie absolutne należy dokonać pomiaru ciśnienia manometrycznego oraz barometrycznego.

Jednostki ciśnienia

Zasadniczą jednostką ciśnienia w układzie SI jest Pascal.

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2=1\text{kg}/\text{ms}^2.$$

Jest to jednostka bardzo mała odpowiadająca około 0,1mm słupa wody. Stąd używa się wielokrotności:

- 1 megapascal – $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}=10\text{barów}$
- 1 bar – $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$
- 1 hektopascal – $1\text{hPa}=10^2\text{Pa}=10^{-3}\text{bara}$
- 1 milibar – $1\text{mbar}=10^2\text{Pa}=10^{-3}\text{bara}$
- ciśnienie wyraża się także w jednostkach wysokości:
 - 1mm słupa wody – $1\text{mmH}_2\text{O}$
 - 1mm słupa rtęci – 1Tor (Tr)
 - atmosfera fizyczna – $760\text{Tr}=1,01325\text{bara}$.

Przyrządy do pomiaru ciśnienia

Przyrządy te są bardzo różnorodne a można je podzielić według następujących kryteriów:

- według zasady działania: hydrostatyczne, sprężynowe, tłokowe, elektryczne,
- według przeznaczenia: manometry do pomiaru nadciśnienia; wakuometry – do pomiaru podciśnienia; mikromanometry – do pomiaru małych nadciśnień, podciśnień, do pomiaru różnicy ciśnień; barometry – do pomiaru ciśnienia atmosferycznego (barometrycznego).

Tutaj tylko skrótowo omówimy niektóre z nich:

- hydrostatyczne (cieczowe) – manometr dwuramienny – U-rurka, manometr z rurką pochyłą oraz barometr,
- manometry sprężynowe:
- manometry elektryczne:

Powszechnie używa się określenia manometry ale można używać także słowa ciśnieniomierze.

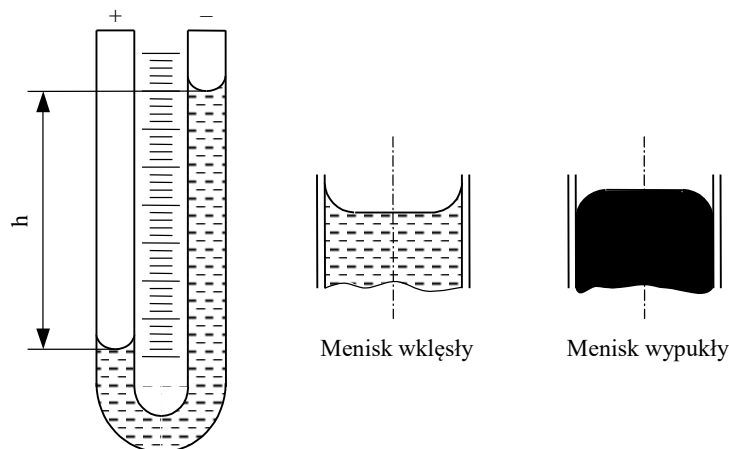
Ciśnieniomierze hydrostatyczne

W tych przyrządach mierzone ciśnienie równoważone jest ciśnieniem hydrostatycznym słupa cieczy manometrycznej.

Ciecze te powinny charakteryzować się możliwie stałą gęstością, zdolnością do tworzenia wyraźnego menisku oraz nie powinny mieszać się z płynem, którego ciśnienie mierzymy. W doborze cieczy manometrycznej ważną rolę odgrywa gęstość. Najczęściej spotykanymi cieczami mogą być: alkohol etylowy, woda i rtęć. Ich gęstość zmienia się w granicach: około 800 kg/m^3 dla alkoholu, 1000 kg/m^3 dla wody i 13550 kg/m^3 dla rtęci. Gęstości tych cieczy zmieniają się wraz z temperaturą, ale zmiany te nie są znaczące.

Formy menisku cieczy manometrycznej pokazano na rys. 2. Woda ma menisk wklęsły, a rtęć wypukły.

Manometr cieczowy dwuramienny, popularnie zwany U-rurką, stanowi szklana rurka wygięta w kształcie litery U – rys. 2. Jest to przyrząd bardzo prosty i tani, nawet we własnym wykonaniu. Ma raczej cechy przyrządu laboratoryjnego, ale służyć także do pomiarów technicznych, zwłaszcza kontrolnych.

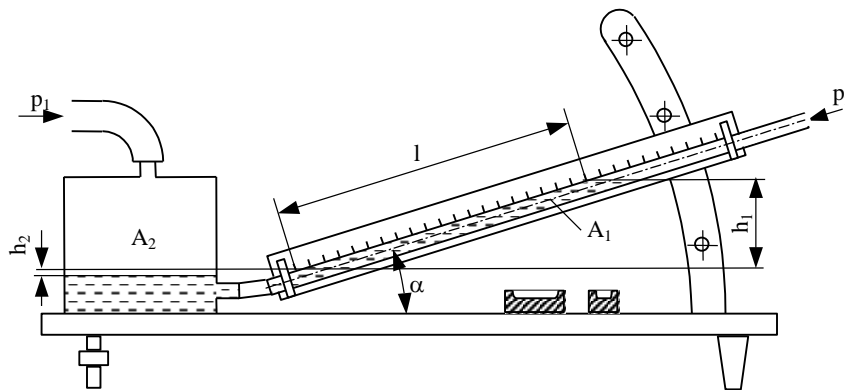


Rys. 2. Manometr cieczowy (U-rurka)

U-rurką można mierzyć nadciśnienia i podciśnienia, a także różnice ciśnień. Zakres pomiarowy zależy od rodzaju cieczy manometrycznej, może to być w granicach 1 metra słupa wody lub rtęci. Z gęstości tych cieczy wynika wartość mierzonego ciśnienia. Dla uniknięcia wpływu włoskowatości na wskazania należy stosować odpowiednie średnice rurek 10-12 mm dla wody a 5 mm dla rtęci. Włoskowatość powoduje podniesienie dolnego menisku przy ścianie w przypadku menisku wklęsłego – rys. 2.

Dokładność odczytu można oszacować na 0,5 mm. Z tego można obliczyć wartość błędów z dwóch menisków oraz błąd względny, jako stosunek błędów bezwzględnych do wartości mierzonej. Z tych obliczeń można się przekonać, że U-rurki są manometrami dokładnymi, zwłaszcza do większych wartości h .

Dla pomiaru małych ciśnień stosuje się mikromanometry na przykład z rurką pochyłą – rys. 3. Jest to mikromanometr typu naczyniowego. Oznacza to, że jedna część manometru dwuramiennego jest w postaci naczynia o dużej średnicy d_1 w stosunku do średnicy d_2 pochylonej rurki. Mikromanometrem można także mierzyć nadciśnienia i podciśnienia, kiedy jedna z rurek połączona jest z otoczeniem. Można też mierzyć różnicę ciśnień.



Rys. 3. Mikromanometr z rurką pochyłą

Pomiar ciśnienia polega na określeniu długości l w pochylonej rurce. Ustalmy teraz wzór na obliczenie mierzonego ciśnienia. Mierzone różnice ciśnień jako hydrostatycznych określa wzór

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (h_1 + h_2) \rho g$$

możemy porównać objętości

$$V = A_1 h_1 = A_2 l = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} l$$

a wysokość h_2 wyrazić poprzez l i kąt pochylenia α

$$h_2 = l \sin \alpha.$$

Stąd sumaryczna wysokość

$$h = h_1 + h_2 = l \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} + \sin \alpha \right)$$

a różnice ciśnień

$$\Delta p = l \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} + \sin \alpha \right) g \rho_{cm}.$$

Średnicę naczyńa dobiera się tak, aby stosunek d_2^2/d_1^2 dążył do zera (np. gdy $d_2/d_1 < 1/35$, to $d_2^2/d_1^2 < 1/1225 \approx 0,0008$). Wtedy powyższe równanie sprowadza się do prostej zależności:

$$\Delta p = l g \rho_{cm} \sin \alpha. \quad (8)$$

Mikromanometr z rurką pochyłą napełnia się alkoholem etylowym (denaturatem), który nie zwilża rurki szklanej i nie zniekształca menisku jak to ma miejsce w przypadku wody.

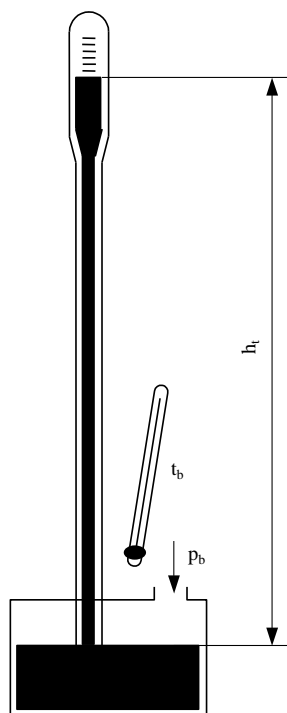
Kąt pochylenia jest ograniczony do dolnej granicy $\alpha=10^\circ$ ze względu na zniekształcenie menisku.

Mikromanometr musi być wyposażony w śruby regulacyjne do jego wypoziomowania – dwa wskaźniki poziomym.

Do pomiaru absolutnego ciśnienia atmosferycznego stosuje się barometry. Mogą one być typu hydrostatycznego lub sprężystego. Ten drugi jest zbudowany na zasadzie płaskiej puszkii sprężystej, z której wnętrza usunięto powietrze, czyli zakładamy istnienie próżni absolutnej. Zmienne ciśnienie otoczenia powoduje odkształcanie puszkii jako jego miarę. Taki przyrząd do pomiaru ciśnienia barometrycznego nazywa się aneroidem. Tutaj ograniczymy się do barometru hydrostatycznego, napełnionego rtęcią – zwanego barometrem naczyniowym, rtęciowym – rys. 4. W zbiorniczku z rtęcią wstawiona jest rurka napełniona uprzednio rtęcią o długości około 1m. Po wstawieniu rurki do naczyńia, słupek rtęci opadnie do poziomu h między meniskami w naczyńiu i rurce, odpowiadającego ciśnieniu hydrostatycznemu równoważonego przez ciśnienie barometryczne

$$p_b = g \rho_{cm} h. \quad (9)$$

Wzór ten możemy zapisać w tej postaci jeśli nad rtęcią panuje próżnia absolutna. W rzeczywistości nad rtęcią są pary rtęci, ale ciśnienie tej pary jest bardzo małe, rzędu $0,002 \text{ Tr} \approx 0,002 \text{ mmHg}$ i można je pominąć. Mówimy wtedy o próżni Torricellego.



Rys. 4. Barometr naczyniowy

Rurka i naczynie przymocowane są do obudowy – płyty lub osłony metalowej, do której przymocowana jest skala. Skala ta jest liniowa (równomierna) ponieważ w ten sposób uwzględnia się zmianę poziomu rtęci w naczyniu wraz ze zmianą ciśnienia barometrycznego i wysokości h . Dla uniknięcia wpływu włoskowatości stosuje się rurki o średnicy 10-12mm.

Wraz ze zmianą temperatury otoczenia, w tym też temperatury rtęci i skali, rtęć zmienia swą gęstość, a rurka i skala zmieniają swą długość. Dokonany odczyt na skali p_{bt} w danej temperaturze t_b trzeba przeliczyć na 0°C według wzoru

$$p_{bo} = p_{bt} [1 - (\alpha - \beta)t_b] \quad (10)$$

aby wyniki pomiarów były porównywalne. We wzorze tym współczynniki α i β wynoszą:

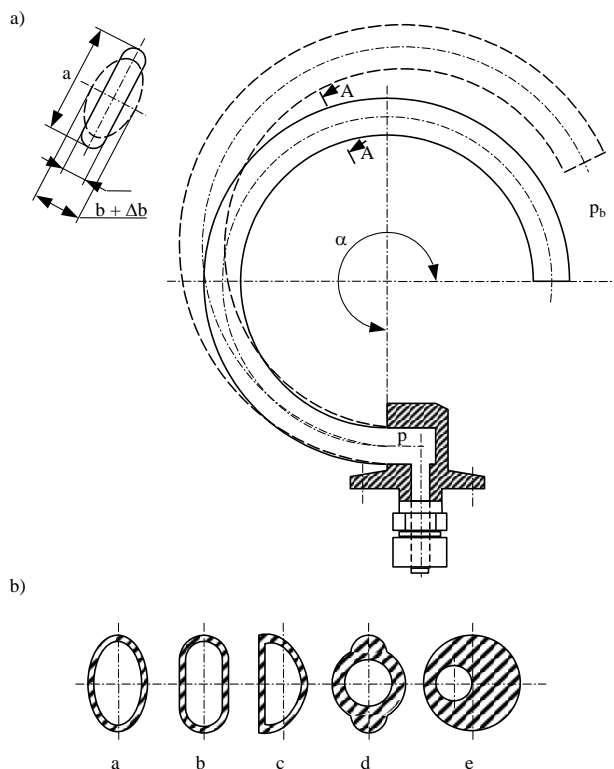
- współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci $\alpha=0,000181$ 1/K
- współczynnik rozszerzalności liniowej podziałki $\beta=0,000019$ 1/K – dla mosiądzu
 $\beta=0,000011$ 1/K – dla stali
 $\beta=0,000005$ 1/K – dla drewna
 $\beta=0,000008$ 1/K – dla szkła.

Manometry sprężynowe

Manometry sprężynowe działają na zasadzie wykorzystania odkształceń sprężystych, odpowiednio dobranych elementów, proporcjonalnych do wielkości działającego na nie ciśnienia. Można nimi mierzyć nadciśnienia i podciśnienia.

Najczęściej elementem sprężystym jest rurka Bourdona – rys. 5. jest to sprężyna rurkowa wygięta pod kątem α a jej przekrój jest odpowiednio spłaszczony. Z pokazanych na rys. 5 przekrojów rurki najczęściej stosowany jest przekrój

eliptyczny a) lub owalny b). Jeden koniec rurki przymocowany jest do króćca doprowadzającego impuls ciśnienia, a drugi koniec jest zamknięty. Rurka może się odchyłać pod wpływem ciśnienia, a jej ruch poprzez odpowiedni mechanizm dźwigniowy lub przekładnię zębatą przenoszony jest na obrotową wskazówkę.



Rys. 5. Sprężyna rurkowa (rurka Bourdona): a) odkształcenie rurki manometrycznej, b) stosowane przekroje poprzeczne rurek

Pod wpływem doprowadzonego ciśnienia rurka się odkształca, wyprostowując się. To odkształcenie wynika ze zmiany kształtu przekroju rurki – wymiar b zwiększa się a wymiar a maleje. Powstałe odkształcenia wywołują siłę rozciągającą na promieniu zewnętrznym a na promieniu wewnętrznym siłę rozpierającą. Jest jeszcze drugi element, mianowicie długość ścianki zewnętrznej jest dłuższa niż wewnętrznej i odpowiednio powierzchnie na które działa mierzone ciśnienie. Siła wypadkowa działa na zewnątrz czyli wyprostowuje rurkę. Przesunięcie końca rurki jest w granicach paru do parunastu milimetrów.

Wymiary rurki i materiał dobiera się do zakresu mierzonego ciśnienia. Manometr z rurką Bourdona może mierzyć ciśnienia w zakresie od $0,01 \div 1000$ barów. Klasa tych manometrów jest w granicach $0,2 \div 0,6$ – manometry laboratoryjne i kontrolne, a techniczne w granicach $1 \div 2,5$. przy doborze zakresu manometrów należy kierować się następującymi zasadami: maksymalne ciśnienie nie powinno przekraczać $2/3$ skali manometru, a minimalne nie powinno być niższe niż $1/3$ skali.

Przy pomiarze ciśnienia czynnika o wysokiej temperaturze należy wprowadzić odpowiednie zabezpieczenia. Wysoka temperatura niekorzystnie wpływa na właściwości sprężyste manometrów. Najczęściej stosuje się zabezpieczenie w postaci rurki syfonowej. W przypadku pomiaru ciśnienia pary w rurce para się ochładza i skrapla się. Do manometru dochodzi woda o temperaturze zbliżonej do otoczenia.

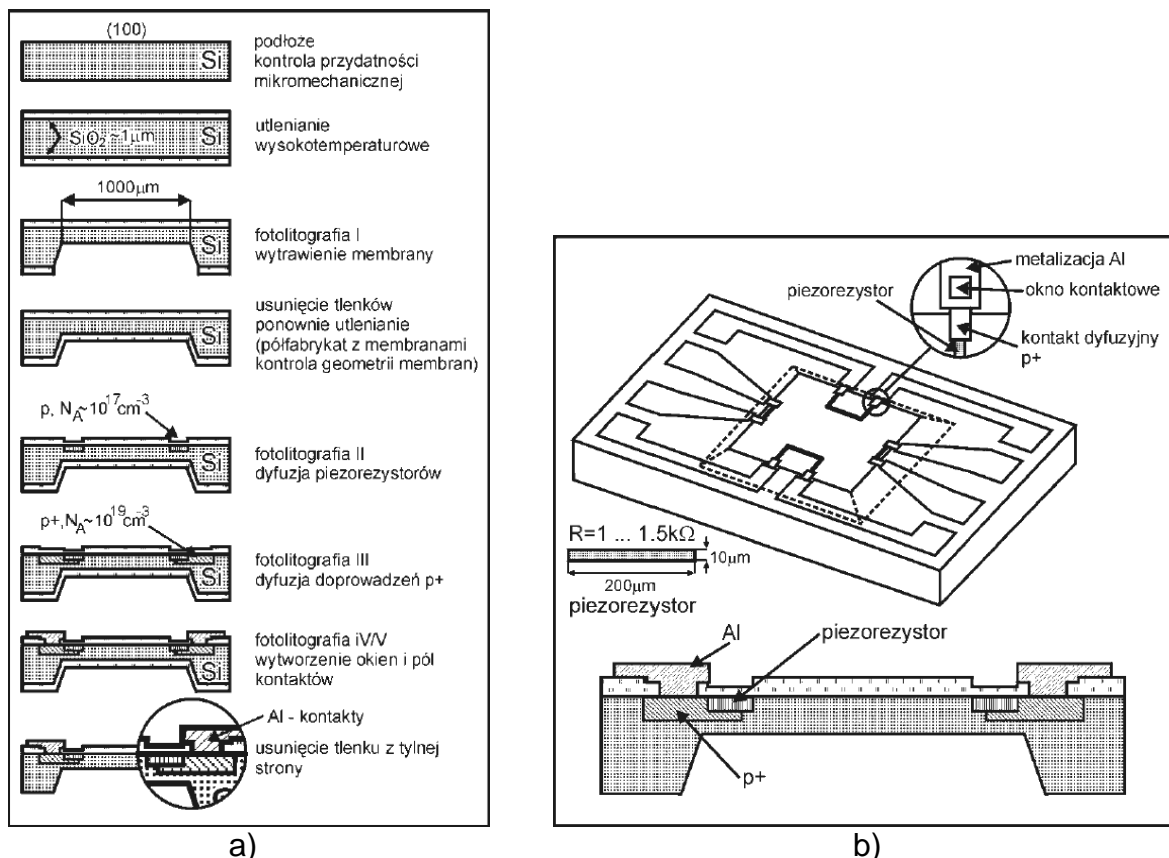
Pomiędzy manometrem a rurką syfonową umieszczony jest kurek trójdrogowy, który umożliwia:

- przedmuchiwanie połączenia w celu zbadania jego drożności
- połączenie przewodu z manometrem w czasie normalnej pracy
- odcięcie manometru od przewodu i połączenie z atmosferą, co umożliwia sprawdzenie zerowego wskazania wskazówki lub pozwala na wymianę manometru.

Manometry elektryczne (piezorezystancyjne czujniki ciśnienia)

Technologia wytwarzania krzemowych czujników ciśnienia jest jedną 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 techniką dyfuzji 2 lub 4 piezorezystory, których grubość wynosi najczęściej ok. $2\text{--}10\mu\text{m}$. 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 (mostek Wheatstone'a).

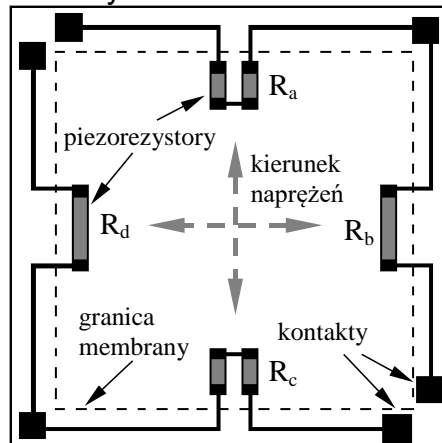
Schemat budowy piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia oraz sposób jego wytwarzania przedstawia rys. 6 a, b.



Rys. 6. Schemat budowy piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia: a) technologia wytwarzania, b) konstrukcja wewnętrzna.

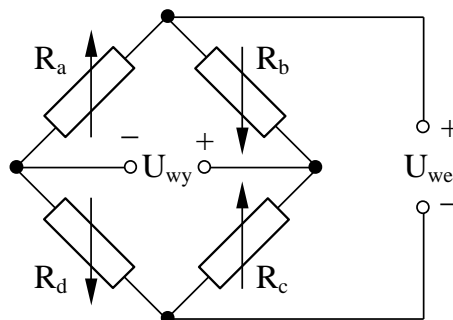
Istotną zaletą piezorezystancyjnych czujników ciśnienia jest możliwość pomiaru wartości ciśnień poza zakresem pracy czujnika (np. 2, 3, 4-krotne przeciążenie czujnika). Po przekroczeniu zakresu pracy czujnika jego charakterystyka przestaje być liniowa i wskazania są mniej dokładne, natomiast po powrocie do zakresu pracy czujnik ponownie działa prawidłowo.

Czujniki projektuje się zazwyczaj przy pomocy metody elementów skończonych lub innych symulacji w celu znalezienia kształtów membrany i rezystorów oraz ich wzajemnej konfiguracji - szuka się maksymalnej czułości. Przykładowy kształt membrany czujnika łącznie z rozmieszczeniem piezorezystorów oraz kierunkiem działania naprężeń przedstawia Rys. 7.



Rys. 7. Konstrukcja membrany czujnika wraz z rozmieszczeniem piezorezystorów.

Najprostszym połączeniem piezorezystorów tworzących czujnik jest układ mostka Wheatstone'a (Rys. 8.). Jest on utworzony z czterech piezorezystorów znajdujących się przy czterech krawędziach membrany czujnika. Pod wpływem ciśnienia doprowadzonego prostopadle membrana ulega odkształceniu - z nią również piezorezystory.



Rys. 8. Układ piezorezystorów tworzących mostek Wheatstone'a.

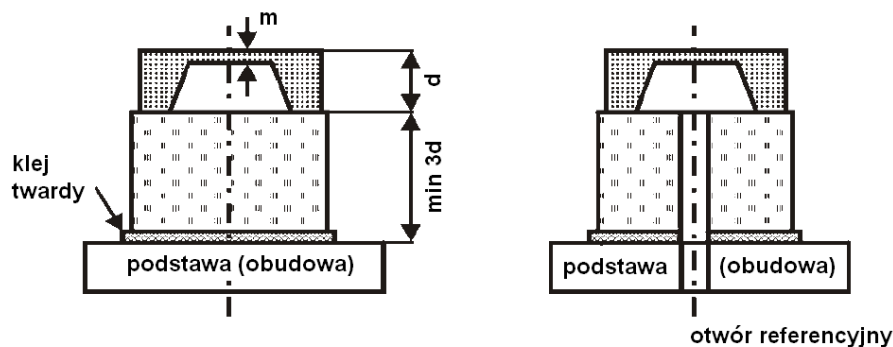
Dwa z nich (R_a i R_c) umieszczone równolegle do kierunku naprężenia są rozciągane i ich rezystancja rośnie. Dwa (R_b i R_d) umieszczone prostopadle do kierunku naprężenia są ściskane, a ich rezystancja maleje ze wzrostem ciśnienia (Rys. 8.). Rezystory równoległe (R_a i R_c) są utworzone z pary elementów połączonych szeregowo w celu zwiększenia czułości, natomiast ich absolutna rezystancja jest taka sama jak rezystorów zorientowanych prostopadle. Piezorezystory o tym samym kierunku zmian odkształceń i zarazem rezystancji są umieszczone naprzeciwko

siebie w mostku. Napięcie wyjściowe mostka rośnie, gdy rezystancje R_a i R_c rosną, a R_b i R_d maleją wg zależności:

$$U_{wy} = U_{we} \left(\frac{R_c}{R_b + R_c} - \frac{R_d}{R_a + R_d} \right)$$

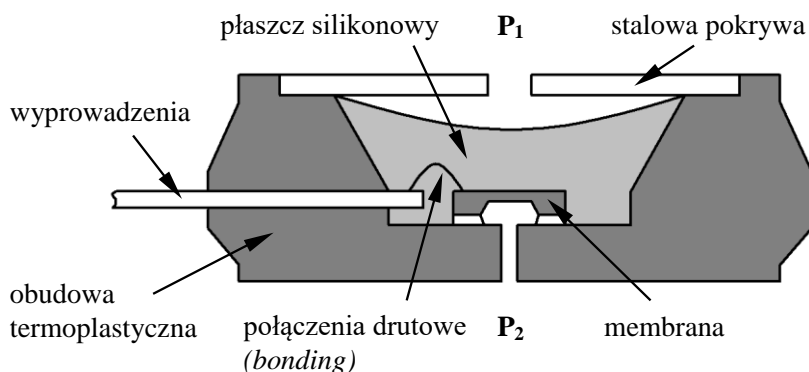
Poza membraną czułą na ciśnienie mogą znajdować się układy równoważące mostek, dopasowujące zakres, kompensujące błędy temperaturowe itp. Czujniki posiadające takie układy zintegrowane nazywa się skompensowanymi.

Struktura czujnika jest osadzona na warstwie szkła o identycznej rozszerzalności cieplnej jak krzem, a często dodatkowo na podłożowej płytce krzemowej. Jeśli czujnik jest przeznaczony do pomiaru ciśnienia bezwzględnego (absolutnego), wówczas w wytrawionej komorze znajduje się próżnia odniesienia. Czujniki mierzące ciśnienie względne lub nadciśnienie mają nieco inną budowę. Aby możliwe było doprowadzenie ciśnienia z dwóch stron membrany, podłoże szklane i obudowa mają specjalnie przygotowany otwór (Rys. 9.).



Rys. 9. Montaż piezorezystancyjnych czujników ciśnienia – struktura na szkłe, od lewej czujnik bezwzględny i czujnik względny.

Rodzaj obudowy różni się w zależności od przeznaczenia czujnika. Podstawowym jej zadaniem jest doprowadzenie ciśnienia do membrany - najczęściej przez specjalną dyszę oraz ochrona delikatnej struktury przed szkodliwymi oddziaływaniami chemicznymi i mechanicznymi. Szczelna obudowa wykonana jest z wytrzymałego materiału termoplastycznego w kształcie kapsuły (rys. 10.). Struktura czujnika połączona jest cienkim złotym drutem (*bonding*) z wyprowadzeniami wychodzącymi na zewnątrz obudowy. Powierzchnia membrany oraz doprowadzenia są pokryte żel silikonowym, tak aby odizolować je od szkodliwego działania środowiska. Żel ten jest gęsty i sprężysty, dzięki czemu przenosi sygnał ciśnienia do krzemowej membrany.



Rys. 10. Czujnik ciśnienia w obudowie-kapsule.

Sygnał z czujnika ma zazwyczaj wartość co najwyżej dziesiątek miliwoltów dla pełnego zakresu zmian ciśnienia. Dlatego sygnał napięciowy z mostka pomiarowego utworzonego przez 4 piezorezystory jest najczęściej podawany na obwody wzmacniające i dopasowujące poziomy napięcie.

Czujniki ciśnienia występują w trzech różnych konfiguracjach, które pozwalają na pomiar ciśnienia absolutnego, względnego i nadciśnienia. Ciśnienie absolutne (np. barometryczne) jest mierzone w odniesieniu do próżni wytworzonej w przestrzeni poniżej membrany. Ciśnienie względne (np. powietrza przepływającego przez zawór) jest mierzone poprzez doprowadzenie impulsu ciśnienia z rurociągu przed zaworem i za zaworem jednocześnie do przeciwnych stron czujnika. Pomiar nadciśnienia (np. ciśnienia krwi) jest specjalnym przypadkiem pomiaru ciśnienia względnego, gdzie jako referencję używa się ciśnienia atmosferycznego.

Dla przykładu, na poniższym rysunku zaprezentowano miniaturowy piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia firmy KULITE, którego średnica zewnętrzna wynosi $d = 2$ mm, natomiast długość $l = 13$ mm. Przetwornik ten przeznaczony jest do pomiaru ciśnień zmiennych w czasie, przy czym mierzona wartość ciśnienia jest wartością względną. Możliwe jest to dzięki zastosowanej w tylnej części czujnika rurki referencyjnej (Rys. 11).



Rys. 11. Miniaturowy piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia.

Kompensacja błędów temperaturowych

Błąd temperaturowy występujący w piezorezystancyjnych czujnikach ciśnienia ma dwie składowe. Pierwsza to *błąd zera*, wynikający ze zmiany sygnału wyjściowego z temperaturą przy zerowym ciśnieniu wejściowym. Druga składowa to *błąd czułości*, którego źródłem jest zmienność rezystancji mostka wraz z temperaturą oraz zależność stałej czułości piezorezystorów od temperatury.

Celem kompensacji tych błędów jest wyzerowanie mostka przy zerowym ciśnieniu w określonej temperaturze odniesienia (np. 25°C). Napięcie niezrównoważenia mostka można skompensować przez odpowiedni dobór rezystancji w każdej z gałęzi mostka.

Najczęściej stosuje się rezystancje szeregowę i równoległą. Klasycznym sposobem doboru tych rezystancji jest ustawienie zera mostka w dwóch temperaturach. Kompensacja będzie zapewniona również dla innych temperatur, jeśli założymy liniowość mostka i liniową zależność błędu zera od temperatury.

Procedura wykonania ćwiczenia

Ostrożnie wyjmij tłok z cylindra następnie go zważ (zachowaj ostrożność, ponieważ uszkodzenie tłoka, który wykonany jest bardzo precyzyjnie, wpłynie na wyniki pomiarów).

Korzystając z zamontowanej poziomicznej wypoziomującej aparaturę za pomocą regulowanych nóżek.

Upewnij się że zawór odpływowy (usytuowany z tyłu podstawy wskaźnika Bourdona) jest zamknięty.

Otwórz całkowicie zawór dławiący oraz zawór od dna naczynia.

Bez obciążenia wyciągnąć tłok do góry na odległość około 6cm (maksymalny suw tłoka). Nastąpi zasysanie wody do układu hydraulicznego. Następnie wsuń tłok do dna cylindra. Powtórz te czynności jeszcze kilka razy, do momentu usunięcia wszystkich pęcherzyków powietrza z układu hydraulicznego.

Podnieś tłok na wysokość końca cylindra ale tak żeby nie wpuścić powietrza do środka, a następnie zamknij zawór od dna naczynia

Ustaw pokrętkę w pozycji "Output".

Aparatura tego stanowiska laboratoryjnego zaprojektowana została na ciśnienia 0-200kN/m². **NIE PRZEKRACZAJ TEGO CIŚNIENIA!** Korzystaj wyłącznie z ciężarków wchodzących w skład stanowiska.

Obróć tłokiem w cylindrze, aby zminimalizować tarcie pomiędzy tłokiem oraz cylindrem. Odczytaj kąt poruszającej się igły za pomocą wskaźnika Bourdona.

Obciąż tłok ciężarkiem 0,5kg, ponownie obróć tłokiem, odczekaj ok. 1 sekundę (czas potrzebny na ustabilizowanie się odczytu na wskaźniku Bourdona). zanotuj wartość obciążenia oraz wyniki wyznaczone przez wskaźnik (kąt odchylenia igły).

Powtórz procedurę dla kolejnych obciążeń - obciążenie zwiększaj co 0,5kg

Odcinając tłok (kolejno co 0,5 kg), ponownie go obracaj w celu minimalizacji sił tarcia oraz zapisuj wartość obciążenia tłoka i kąt o jaki odchylił się igła. Dzięki temu uzyskasz po dwie wartości odchylenia igły dla tego samego obciążenia, dokonaj uśrednienia otrzymanych wyników (dzięki temu zredukowane zostaną efekty powstałych błędów podczas pojedynczego odczytu).

Oblicz wytworzone ciśnienie dla każdego momentu obciążenia.

Oblicz średni kąt odchylenia igły dla każdego zadanego obciążenia.

Powtórz eksperyment. Tym razem zapisuj wartości obciążenia oraz wskazane wyniki ciśnienia na podziałce z wskaźnika Bourdona. Porównaj wyniki z uśrednionymi wartościami kąta igły zanotowanymi wcześniej.

Kalibracja półprzewodnikowego czujnika ciśnienia:

Obróć tłokiem. Zanotuj powstałe napięcie wyjściowe z wyświetlacza dla półprzewodnika.

Obciąż tłok ciężarkiem o masie 0,5kg, obróć tłok. Zanotuj wartość obciążenia oraz powstałego napięcia. Powtórz tą procedurę zwiększając obciążenie tłoka w każdym kroku o 0,5kg. Odciażając tłok, kolejno co 0,5kg, postępuj identycznie - notuj wartość obciążenia oraz powstałego napięcia.

Oblicz ciśnienie powstałe w układzie w wyniku obciążania tłoka.

Oblicz średnią wartość powstałego napięcia dla każdego obciążenia tłoka..

Powoli otwórz zawór na dnie naczynia, Otwórz zawór całkowicie oraz sprawdź, czy zawór dławiący jest również całkowicie otwarty. Ciecz w systemie będzie poddana działaniu ciśnienia atmosferycznego, w przybliżeniu (będzie ono nieznacznie wyższe niż rzeczywiste ciśnienia atmosferyczne z powodu cieczy znajdującej się w zbiorniku, ale jest to nieistotne i nie wpływa na odczyty czujników).

Pokrętko na konsoli ustaw w pozycji "PRESSURE".

Przy użyciu pokrętki ZERO znajdującego się na konsoli ustaw na wyświetlaczu wartość zero - jest to ustawienie punktu odniesienia dla kalibracji czujnika.

Podnieś tłok do górnego poziomu cylindra (uważaj aby powietrze nie dostało się do środka), następnie zamknij zawór na dnie naczynia.

Obciąż tłok maksymalnie tłok (korzystaj wyłącznie z ciężarków będących na wyposażeniu stanowiska). Obróć tłok następnie przekręć pokrętkiem SPAN aż czujnik napięcia wyjściowego wskaże zadane ciśnienie. W ten sposób kreślony zostanie drugi punkt odniesienia do kalibracji.

Usuń obciążenie tłoka. Obciążaj tłok kolejnymi ciężarkami zwiększając masę o 0,5 kg, po każdym obciążeniu obróć tłok. Dla każdego obciążenia dokonaj odczytu i zapisz wskazania czujnika półprzewodnikowego. Następnie odciażaj tłok, co 0,5kg i znów zapisz wskazania czujnika. Dla każdej wartości obciążenia wyznacz wartość średnią wskazań.

Rezultaty

Ciśnienie w układzie hydraulicznym:

$$P_a = F/A$$

gdzie:

$$F = gM$$

F-siła wywierana na ciecz w cylindrze,

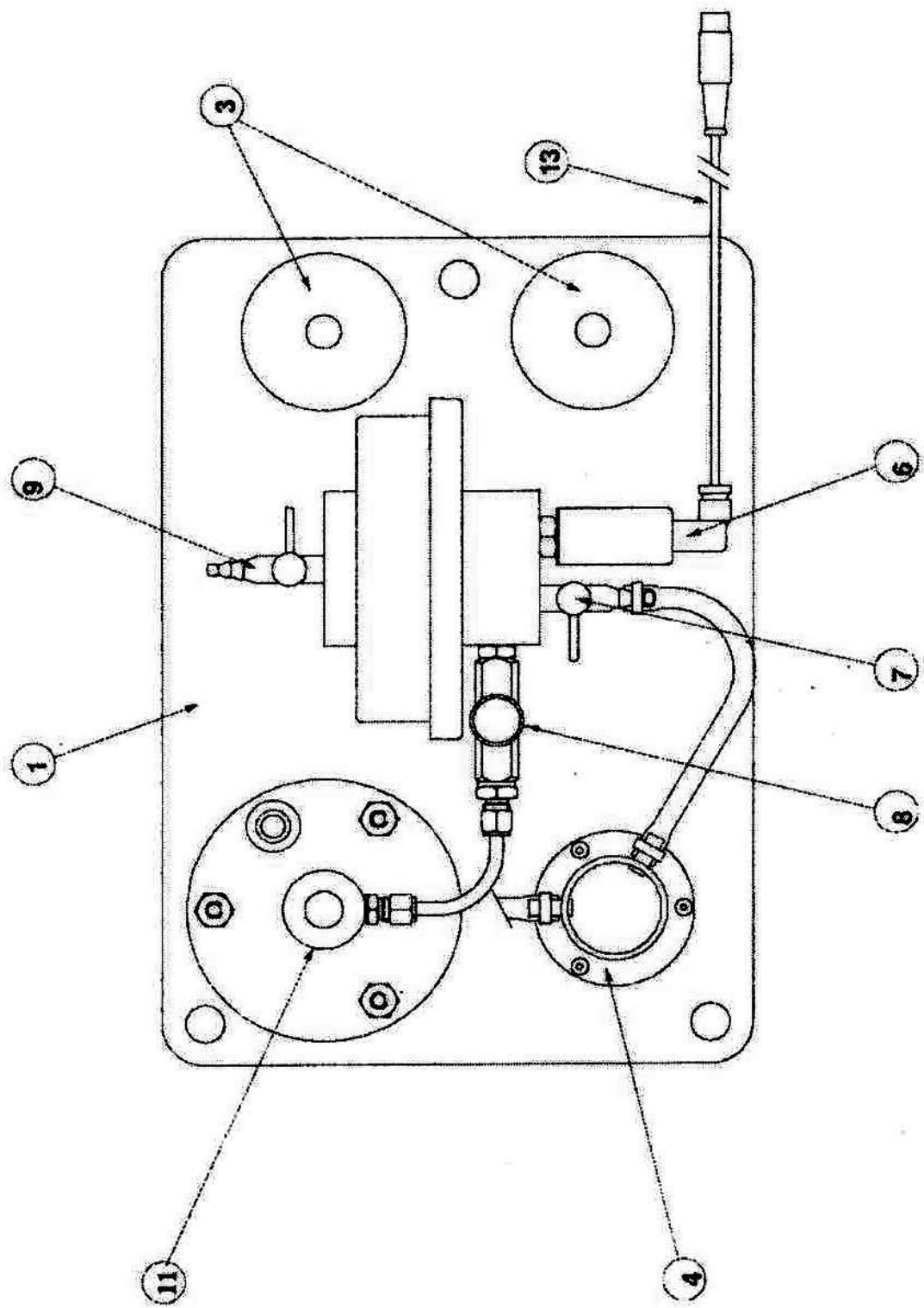
M - masa całkowita (łącznie z masą tłoka),

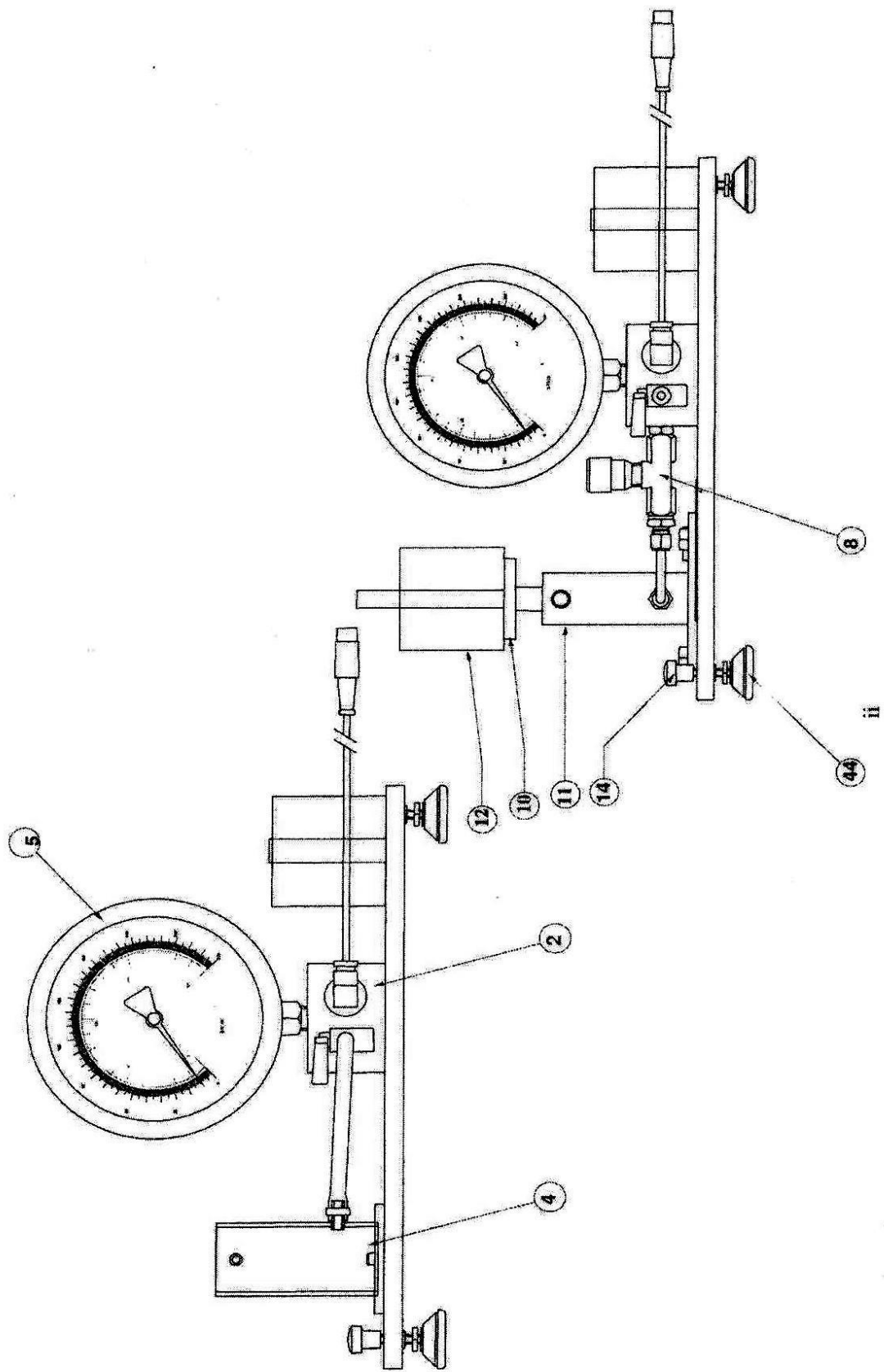
g - przyspieszenie ziemskie,

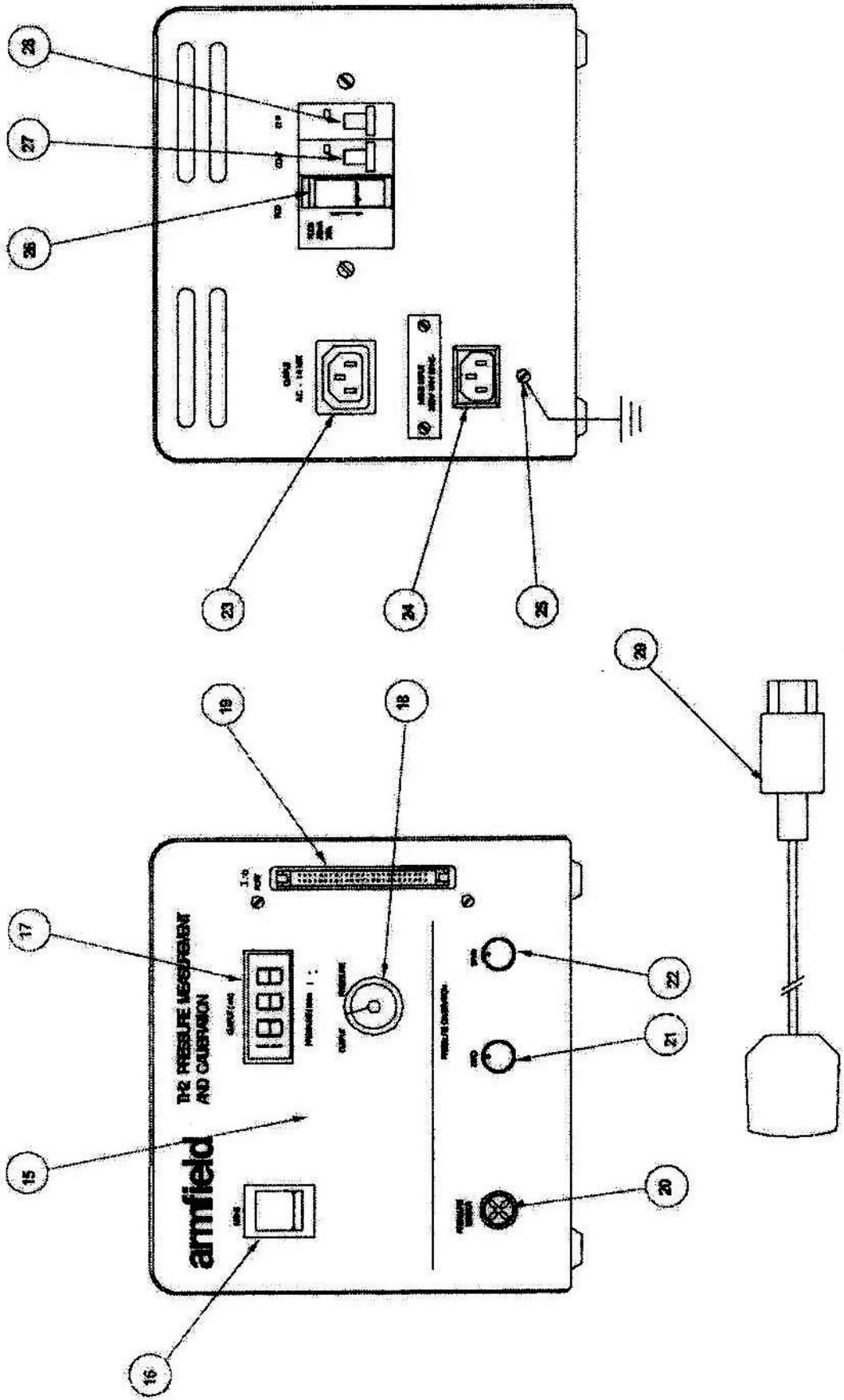
A - powierzchnia tłoka $A = \pi d^2/4$

Opis stanowiska

1. Podstawek
2. przewód rurowy rozgałęziony w bloku
3. Miejsce położenia obciążników
4. Naczynie
5. Wskaźnik Bourdona
6. Czujnik ciśnienia
7. Zawór od dna naczynia
8. Zawór dławiący
9. Zawór odpływowy
10. Tłok
11. Cylinder
12. Obciążniki
13. Kabel czujnika ciśnienia
14. Pokrętko regulujące położeniem poziomym blatu
15. Konsola
16. Główny włącznik/wyłącznik
17. Miernik Cyfrowy
18. Przełącznik
19. Port
20. Gniazdo oznaczone "Pressure Sensor"
21. Pokrętko do regulacji "ZERO"
22. Pokrętko do regulacji "SPAN"
23. Gniazdo kabla zasilającego
24. Główne gniazdo zasilające
25. Uziemienie
26. Główny bezpiecznik
27. Bezpiecznik
28. Bezpiecznik prądu zasilającego
29. Bezpiecznik napięcia wyjściowego (kabla zasilającego)







Narysuj wykres odchylenia igły do ciśnienia odczytanego z wskaźnika Bourdona oraz wykres napięcia wyjściowego do ciśnienia odczytanego za pomocą czujnika półprzewodnikowego.

Narysuj wykres wskazanego ciśnienia do aktualnego ciśnienia odczytanego ze wskaźnika Bourdona oraz skalibrowanego półprzewodnikowego czujnika ciśnienia.

Jeżeli istnieje możliwość zmierzenia ciśnienia barometrycznego, istnieje możliwość obliczenia ciśnienia absolutnego (P_{abs}) dla każdego obliczonego ciśnienia. Ciśnienie otoczenia (P_{ot}) należy zmierzyć i przeliczyć na N/m^2 , jeżeli istnieje taka konieczność. Następnie do powyższej tabelki należy dodać kolumnę z uzyskanymi wynikami.

$$P_{abs} = P_a + P_{ot}$$

Wnioski

Skomentuj liniowość napięcia wyjściowego dla dwóch czujników ciśnienia (kąta nachylenia igły w wskaźniku Bourdona oraz czujnika półprzewodnikowego). Opisz jak te wykresy można użyć, aby obliczyć wskazane ciśnienie z dowolnie odczytanego czujnika.

Skomentuj dokładność kalibracji dla wskaźnika Bourdona oraz czujnika półprzewodnikowego.

Zasugeruj metody dzięki którym dokładność pomiaru czujników mogłaby zostać polepszona.