



Pritisak je neelektrična veličina čije se mjerenje, poslije temperature, najčešće srijeće u brojnim oblastima, kao što su industrija, saobraćaj, medicina, meteorologija i mnogim drugim. Pritisci se mjere u rasponu od visokih pritisaka iznad 10^{10} Pa, pa do ultravakuumu reda veličine 10^{-10} Pa. U ovako širokom opsegu koristi se veći broj mjernih metoda i tipova pretvarača. Primarnu važnost imaju apsolutna mjerenja gdje se pritisak određuje po svojoj definiciji kao odnos normalne sile i površine, pri čemu se obje veličine mjere nekom od apsolutnih metoda. Osim apsolutnog pritiska, od interesa je i mjerenje pritiska u odnosu na ambijentalni pritisak, kao i mjerenje diferencijalnog pritiska u smislu razlike dva pritiska.

Senzori za mjerenje pritiska su kompleksni senzori. To znači da je potrebno u više koraka vršiti konverziju energije prije nego što se dobije konačan električni signal. Princip rada većine senzora pritiska se zasniva na deformaciji ili pomjeraju. Dakle, mjerenje pritiska se veoma često svodi na mjerenje pomjeraja ili sile i odgovarajuće prilagođavanje rezultata.

<https://www.youtube.com/watch?v=iru8tRwS7Yc>

<https://www.youtube.com/watch?v=QrT8VWxdxwk>

NAJČEŠĆI TIPOVI MJERENJA PRITISKA

- Mjerenje apsolutnog pritiska
- Mjerenje barometarskog pritiska
- Mjerenje diferencijalnog pritiska

Najčešće se vrše tri tipa mjerenja pritiska.

Pod mjerenjem apsolutnog pritiska podrazumijeva se mjerenje pritiska u odnosu na odsustvo pritiska, nulti pritisak tj. vakuum.

Mjerenje barometarskog pritiska (označava se i kao *gauge pressure*) podrazumijeva mjerenje pritiska u odnosu na atmosferski pritisak. Atmosferski pritisak se može mijenjati, ali bitna je samo razlika između pritiska u datoj tački i atmosferskog pritiska.

Mjerenje diferencijalnog pritiska je mjerenje razlike pritisaka u dvije tačke, od kojih je jedna vrijednost referentna. Barometarski pritisak je specijalan slučaj diferencijalnog pritiska, pri čemu je jedan od pritisaka jednak atmosferskom pritisku.

JEDINICE ZA PRITISAK

- SI jedinica: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ mbar}$
- $1 \text{ psi} = 6.90 \text{ kPa}$
- $1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg na } 0 \text{ }^\circ\text{C} (\approx 133.26 \text{ Pa})$
- Idealan pritisak Zemljine atmosfere se označava kao fizička atmosfera:
 $1 \text{ atm} = 760 \text{ torr} = 101\,325 \text{ Pa} \approx 1033 \text{ cmH}_2\text{O}$
- ABP (*Arterial Blood Pressure*) se mjeri u mmHg

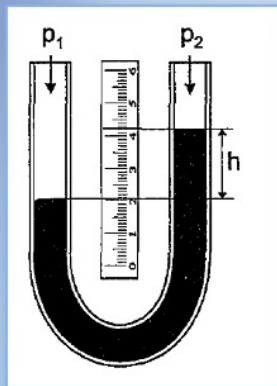
Pritisak u milimetrima živinog stuba se odnosi na temperaturu od $0 \text{ }^\circ\text{C}$, dok s pritisak u centimetrima vodenog stuba odnosi na temperaturu od $+4 \text{ }^\circ\text{C}$. U oba slučaja, to je pritisak fluida na osnovu cijevi u kojoj se fluid nalazi, usljed težine kojom fluid djeluje na osnovu cijevi tj. hidrostatički pritisak:

$$p = \rho gh$$

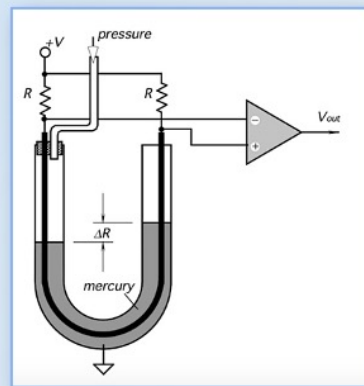
$$\rho_{Hg} = 13\,585 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{H_2O} = 0.9998395 \text{ kg/m}^3$$

MANOMETRI SA TEČNOSTIMA



Manometar sa "U" cijevi



Manometri sa tečnostima se koriste za precizna mjerenja statičkih pritisaka u laboratorijskim uslovima, a takođe i kao etalonski instrumenti za kalibraciju drugih tipova manometara. Rezultat se direktno može očitavati u [mmHg] ([torr]).

Manometar sa "U" cijevi pokazuje razliku pritiska iznad površine tečnosti u krakovima. U stacionarnom stanju razlika pritiska jednaka je hidrostatičkom pritisku:

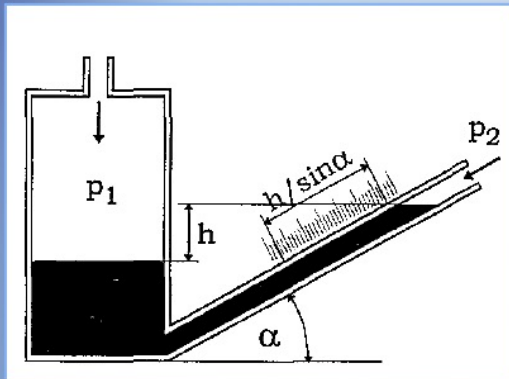
$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h$$

Uobičajene tečnosti su živa, voda i alkohol. U praksi se kao referentni pritisak p_2 najčešće koristi atmosferski pritisak. Za precizno mjerenje pomoću "U" manometara potrebno je ispuniti više zahtjeva. Prije svega potrebno je poznavati tačnu vrijednost gustine tečnosti. Da bi se otklonile termičke promjene gustine tečnosti potrebno je da se manometar nalazi u termostatiranoj prostoriji. U suprotnom, potrebno je vršiti korekcije zbog temperaturnih promjena gustine tečnosti. Drugi značajan problem predstavlja precizno očitavanje razlika nivoa tečnosti u oba kraka. Poseban problem jeste sklonost stuba tečnosti ka oscilacijama, jer se on ponaša kao sistem drugog reda. Uticaj kapilarnih pojava se ublažava upotrebom cijevi većeg prečnika. Iz tog razloga, živini manometri sadrže znatne količine vrlo čiste žive. Potrebno je takođe poznavati i tačnu vrijednost lokalnog gravitacionog ubrzanja.

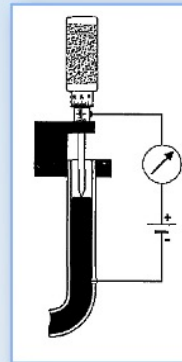
Jedan od načina mjerenja pritiska pomoću „U“ cijevi prikazan je na slici desno. Ukoliko se povećava pritisak u lijevom kraku, nivo žive će se smanjivati, dok će se otpornost „U“ otpornika u tom kraku povećavati. Proporcionalno će se smanjivati otpornost „U“ otpornika u desnom kraku. Izlazni napon je proporcionalan razlici otpornosti ΔR koje nisu prespojene živom.

Veoma značajan nedostatak ovog tipa manometra je što isparenja žive kontaminiraju gas vremenom.

MANOMETRI SA TEČNOSTIMA



Manometar sa nagnutim krakom

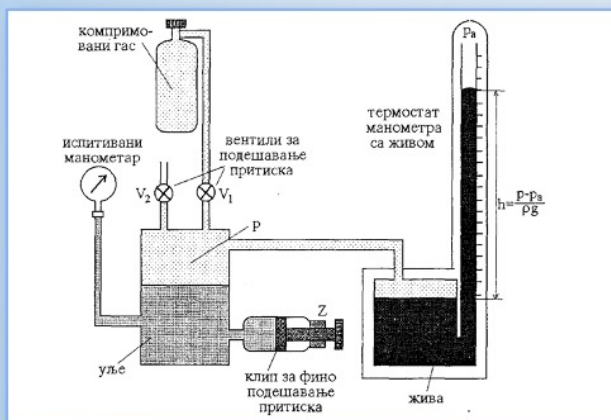


Određivanje nivoa žive
metodom električnog kontakta

Kod manometra sa nagnutim krakom, dužina stuba tečnosti u nagnutom kraku, koja odgovara razlici nivoa h , iznosi $h/\sin\alpha$. Dakle, dobija se povećanje osjetljivosti u odnosu na manometar sa uspravnim kracima.

Mjerenje vrlo malih razlika pritisaka vrši se pomoću tzv. mikromanometara. To su manometri kod kojih se koriste precizni uređaji za očitavanje nivoa tečnosti. Na slici je prikazan jedan krak mikromanometra kod koga se nivo žive određuje metodom električnog kontakta. Iznad žive se postavlja elektroda koja se pomjera dok se ne uspostavi električni kontakt između elektrode i žive, što se registruje ommetrom.

MANOMETRI SA TEČNOSTIMA

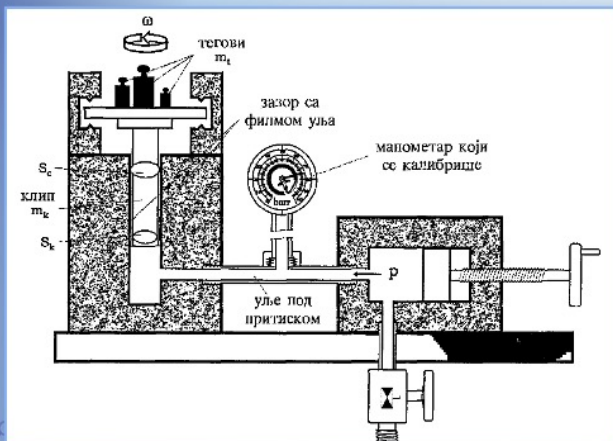


Uređaj za kalibraciju manometra pomoću manometra sa živom (uprošćena šema)

Živinim manometrima se mogu mjeriti pritisci do oko 50 bar. Kod takvih uređaja stub žive iznosi čitavih 40 m. Uređaj se nalazi u tornju specijalno građenom za tu namjenu.

Etalonski manometar za visoke pritiske ima jedan krak i rezervoar za živu. Na slici je prikazana uprošćena šema instalacije etalonskog živinog manometra za visoke pritiske. Za grubo podešavanje pritiska u posudi sa uljem i manometru koristi se ventil V_1 kojim se dovodi gas iz boce pod pritiskom. Grubo smanjivanje pritiska se vrši ispuštanjem gasa pomoću ventila V_2 . Fina regulacija pritiska ostvaruje se pomoću klipa pokretanog zavrtnjem Z kojim se vrši dodatna kompresija ili dekompresija gasa. Rezervoar i cijev živinog manometra se održavaju na konstantnoj temperaturi pomoću termostata sa vodom. Etalonski živini manometri za mjerenje viših pritisaka su rijetki. Oni se zamjenjuju klipnim manometrima koji su jeftiniji a pokrivaju opseg znatno viših pritisaka.

KLIPNI MANOMETRI



$$p = \frac{g(m_k + m_t)}{S_k} + p_a$$

Klipni manometri su uređaji za apsolutno mjerenje pritiska koji u poređenju sa živinim manometrima imaju znatno veći opseg, jednostavniji postupak mjerenja i lakše održavanje. Šema klipnog manometra je prikazana na slici. Njegovi osnovni djelovi su vertikalni cilindar izbušen u masivnom metalnom bloku i klip mase m_k na koga se mogu stavljati tegovi m_t . Ulje pod pritiskom p djeluje na donji bazis klipa površine S_k silom F . Ovoj sili se suprotstavlja težina klipa i tegova, kao i sila usljed vazdušnog pritiska p_a . Ako je zbir svih pomenutih sila jednak nuli, klip će da lebdi u ravnotežnom položaju:

$$p = \frac{g(m_k + m_t)}{S_k} + p_a$$

Kako se sve veličine u datom izrazu mogu izmjeriti pomoću osnovnih veličina, to znači da je mjerenje pritiska klipnom vagom apsolutno mjerenje tj. klipni manometar se može koristiti i nezavisno bez prethodnog etaloniranja pomoću nekog drugog instrumenta.

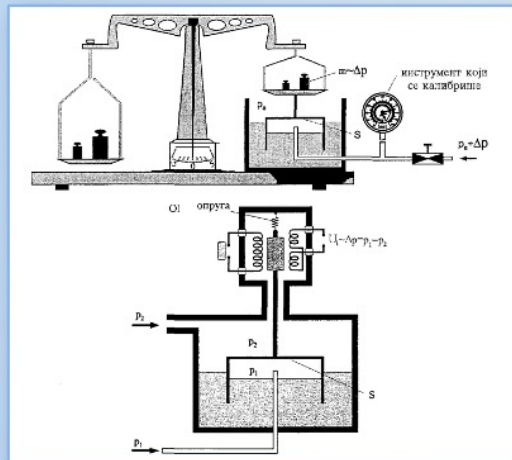
Klipni manometri visoke tačnosti moraju ispunjavati veći broj uslova. Prije svega klip i cilindar moraju biti savršeno kružnog presjeka sa vrlo malim zazorom kako bi se

gubitak ulja kroz zazor mogao zanemariti. Statičko trenje cilindra i klipa se smanjuje tako što se vrši lagana rotacija klipa. Pri tome, okretanje ne smije da utiče na pomjeranje klipa u vertikalnom pravcu. U preciznim proračunima treba uzeti u obzir i dodatnu silu usljed viskoznog trenja koja teži da podigne klip. Ova sila je posljedica uticaja filma tečnosti u zazoru klipa i cilindra.

Usljed temperaturnog širenja klipa i cilindra dolazi do povećane efektivne površine, a samim tim i do greške. Međutim, ova greška je kod klipnih manometara značajno manja nego kod manometara sa tečnostima jer ukupni linearni koeficijent širenja čelika ima značajno manju vrijednost nego zapreminski termički koeficijent žive.

Klipni manometri se koriste i za mjerenje pritisaka gasova.

MANOMETRI SA URONJENIM ZVONOM

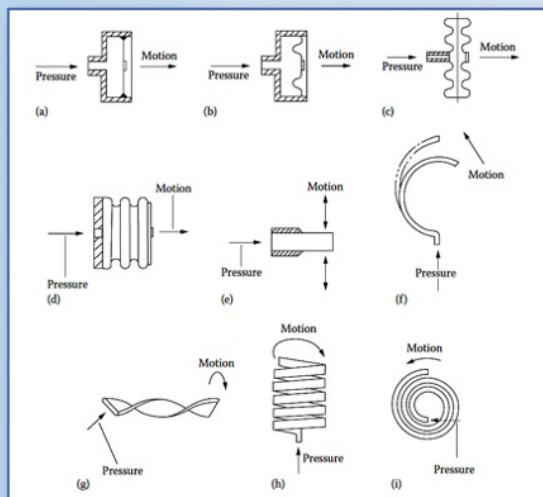


Za apsolutno mjerenje pritiska bliskih atmosferskom koriste se i manometri sa uronjenim zvonom. Manometar se sastoji od ravnokrake vage za čiji je jedan krak pričvršćen cilindar čija je otvorena strana djelimično potopljena u tečnost. Tečnost se nalazi u sudu koji stoji na podlozi. Vaga se dovodi u ravnotežno stanje kada je pritisak u zvonu jednak atmosferskom. Pri promjeni pritiska, na dno cilindra djeluje sila $F = S\Delta p$. Sila F , odnosno promjena pritiska mjeri se dodavanjem tegova kojima se vaga dovodi u ravnotežno stanje. Mjerni princip je dakle isti kao i kod klipnog manometra.

Manometar sa zvonom ima male greške usljed temperature pošto termičko širenje tečnosti ne utiče na mjerenje.

Ovaj manometar se koristi u industrijskim mjerenjima, s tim što se pomjeranje zvona usljed razlike pritiska mjeri senzorom pomjeraja kao što je, na primjer, induktivni pretvarač, slika.

ELASTIČNI PRETVARAČI ZA MJERENJE PRITISKA

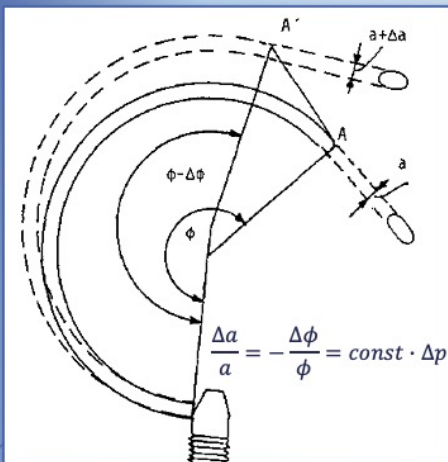


Za praktična mjerenja pritiska kako u statičkim, tako i u dinamičkim uslovima, najčešće se koriste pretvarači na principu elastičnih deformacija tankih metalnih elemenata. Kod manometra u telemetriji, automatici i električnim mjernim instrumentima, deformacija elastičnog elementa rezultuje pomjerajem i mehaničkim naprezanjem koje se pretvara u električni signal pogodnim senzorom. Najrasprostranjeniji elastični pretvarači su *Bourdon-ove* cijevi, membrane (dijafragme), šuplji tanki cilindri, mjevovi itd. Ovi pretvarači se mogu koristiti za mjerenje kako malih, tako i vrlo visokih pritisaka do 7000 bari. Sopstvena učestanost nekih elastičnih pretvarača dostiže više desetina kHz što ih čini pogodnim za mjerenje dinamičkih promjena pritisaka. Elastični pretvarači, opterećeni iznad dozvoljenih granica, trajno mijenjaju svoje karakteristike o čemu se prilikom eksploatacije mora voditi računa.

- (a) ravna dijafragma
- (b) talasasta dijafragma
- (c) kapsula
- (d) mijeh
- (e) prava cijev
- (f) C *Bourdon-ova* cijev

- (g) uvijena *Bourdon*-ova cijev
- (h) helikoidalna *Bourdon*-ova cijev
- (i) spiralna *Bourdon*-ova cijev

BOURDON-OVA CIJEV



Bourdon-ova cijev patentirana 1849. godine predstavlja najstariji i još uvijek vrlo često korišćen elastični pretvarač za mjerenje pritiska. Osnovni tip *Burdon-ove* cijevi "C" tipa prikazan je na slici. Poprečni presjek cijevi je elipsastog oblika. Pod dejstvom razlike unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska presjek cijevi teži da poprimi oblik blizak kružnom. Analiza deformacije *Bourdon-ove* cijevi je veoma složena. Pokazuje se da kraća osa elipsastog poprečnog presjeka i ugao cijevi ϕ imaju relativne deformacije linearno srazmjerne razlici unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska:

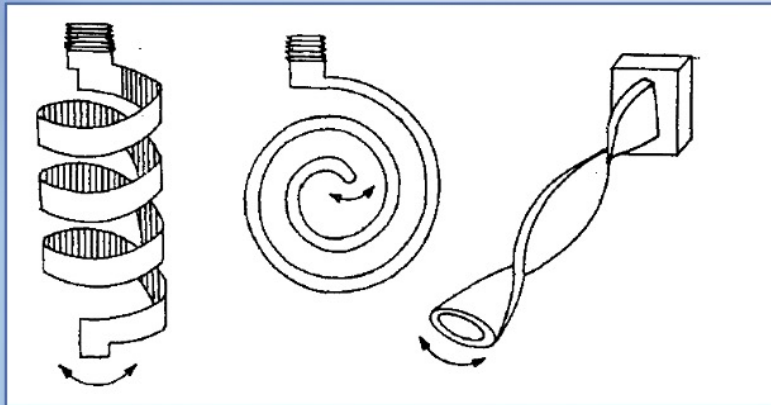
$$\frac{\Delta a}{a} = -\frac{\Delta \phi}{\phi} = \text{const} \cdot \Delta p$$

Kao izlazna veličina *Bourdon-ove* cijevi koristi se pomjeranje slobodnog kraja $\Delta l = \overline{AA'}$ koje je takođe srazmjerno razlici pritisaka Δp .

<https://www.youtube.com/watch?v=lxhNltP8jpl>

<https://www.youtube.com/watch?v=9avIVZP1Ka4>

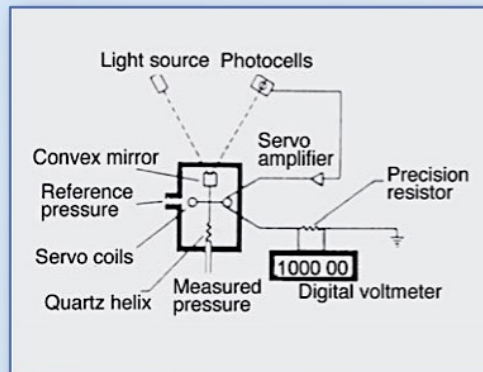
BOURDON-OVA CIJEV



Osjetljivost *Bourdon*-ove cijevi raste sa povećanjem ugla savijanja. S tim u vezi izrađuju se cijevi helikoidalnog, spiralnog, ili uvijenog oblika čiji ugao savijanja iznosi 1 do 10 punih obrtaja.

Osjetljivost se takođe povećava sa smanjenjem debljine cijevi, povećanjem spljoštenosti poprečnog presjeka, smanjenjem radijusa krivine i smanjenjem modula elastičnosti. Kao materijali koriste se razne vrste bronz, čelika i drugih legura. Cijevi sa dobrim elastičnim svojstvima imaju mali koeficijent prigušenja time i sklonost ka oscilacijama izazvanih mehaničkim impulsima. Oscilacije se mogu prigušiti stavljanjem cijevi u sud sa silikonskim uljem.

KVARCNA BOURDON-OVA CIJEV

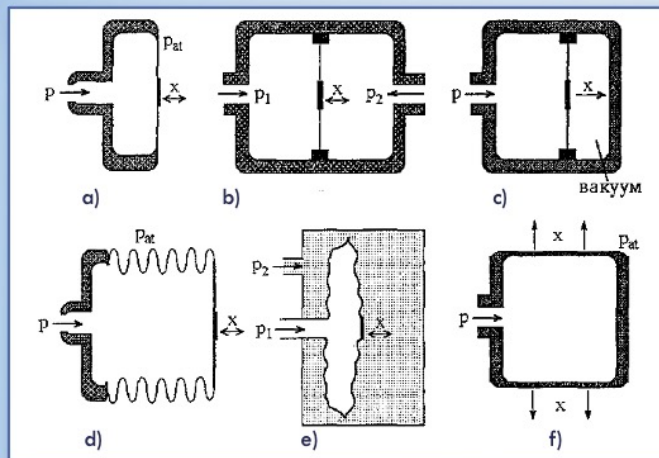


Za vrhunski precizna mjerenja pritiska koriste se manometri sa helikoidalnom *Bourdon*-ovom cijevi od kvarcnog stakla. Poznato je da kvarc predstavlja jedan od materijala sa najboljim elastičnim svojstvima koja se ogledaju u zanemarljivom mehaničkom histerezi i minimalnim gubicima usljed unutrašnjeg trenja. To su upravo osobine koje se očekuju od dobrog materijala za konstrukciju senzora za mjerenje pritiska. Kristal kvarca se prethodno zagrijava do oko 1700 °C pri čemu kvarc omekšava i prelazi u amorfno stanje. Topljeni kvarc od koga se izrađuje *Bourdon*-ova cijev ima vrlo mali koeficijent termičkog širenja koji je 20 do 30 puta manji nego kod većine metala. Osim toga, topljeni kvarc je otporan na uticaj korozivnih tečnosti i gasova i ima malo starenje.

U neopterećenom stanju, svjetlosni snop koji potiče od izvora svjetlosti, se reflektuje sa konveksnog ogledala prema fotoćeliji. Kada se primijeni pritisak na kvarcnu helikoidalnu *Bourdon*-ovu cijev, doći će do njene rotacije, što će pomjeriti ogledalo (međusobno su povezani). Diverzija svjetlosti će dovesti do promjene napona na izlazu fotoćelije. Ovaj napon se usmjerava prema servo pojačavaču i dalje prema solenoidu koji predstavlja dio servo-sistema. Servo namotaji se nalaze u polju stalnog magneta. Struja koja protiče kroz namotaje generiše silu koja se suprotstavlja inicijalnom poremećaju. Struja u namotajima će se povećavati sve dok se ogledalo ne

vrati u početnu poziciju. Rotaciona sila kao posljedica pritiska je kompenzovana magnetskom silom. Kako je magnetska sila direktno proporcionalna struji kroz namotaje, napon se može očitati na krajevima preciznog otpornika. Mjerni princip je veoma precizan i koristi se za mjerenje pritiska od oko 10 mbar do 170 bar sa tačnošću 0.01 % mjernog opsega.

DIJAFRAGME - MEMBRANE

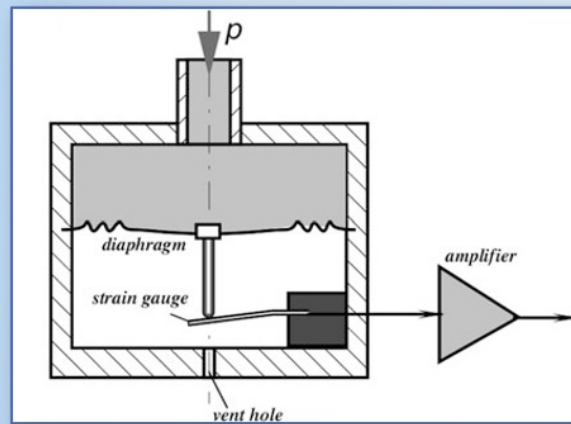


Pretvarači na bazi membrane koriste se u širokom opsegu pritisaka, počev od nižeg vakuuma pa do pritisaka preko 1000 bar. Sila usljed razlike pritisaka sa obje strane membrane izjednačava se sa elastičnim silama membrane izazivajući deformaciju srazmjernu razlici pritisaka. U opštem slučaju deformacija predstavlja nelinearnu funkciju pritiska. Međutim, pretvarači se koriste u ograničenom opsegu gdje im je karakteristika približno linearna.

Pretvarači za srednje i visoke pritiske koriste atmosferski pritisak kao referentni, slika a i b. Pri mjerenju vrlo niskih pritisaka kao referentni pritisak uzima se vakuum, slika c. Naborane membrane daju veće izlazno pomjeranje od ravnih membrana. Jedan od najčešće korišćenih pretvarača sa naboranom membranom je aneroid čija su dva tipa prikazana na slikama d i e. Za mjerenje visokih pritisaka koriste se i pretvarači oblika šupljeg cilindra od tankog čeličnog lima čiji se poluprečnik povećava sa pritiskom, slika f.

<https://www.youtube.com/watch?v=JnPSeEW-EeA>

DIJAFRAGME - MEMBRANE



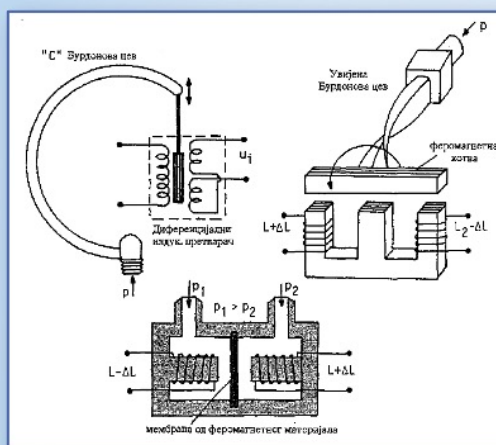
Primjer konverzije pritiska u linearni otklon je dijafragma aneroidnog barometra. Uz pomoć mjerne trake otklon se konvertuje u električni signal.

ELASTIČNI MANOMETRI SA ELEKTRIČNIM IZLAZNIM SIGNALOM

- Manometri sa potenciometrom
- Manometri sa induktivnim pretvaračima
- Manometri sa kapacitivnim pretvaračima

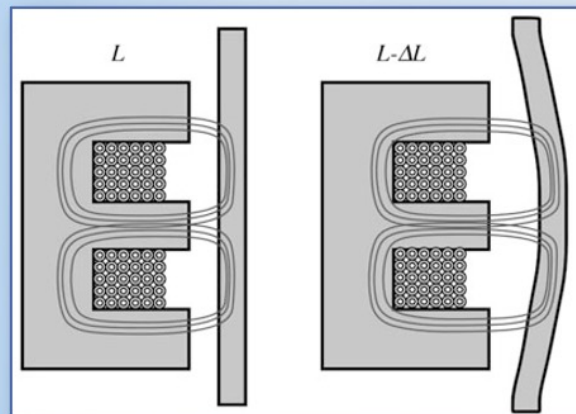
Elastične deformacije manometra mogu se pretvoriti u električni signal velikim brojem senzora pomjeraja kao što su potenciometri, induktivni, i kapacitivni pretvarači, mjerne trake, piezoelektrični, optoelektronski itd. Potenciometri se jednostavno kombinuju sa električnim manometrima spajanjem klizača sa pokretnim krajem manometra. Osnovna prednost im je jednostavnost i velika vrijednost izlaznog signala koji se direktno može voditi na indikator. Međutim, tačnost im nije visoka.

MANOMETRI SA INDUKTIVNIM PRETVARAČIMA



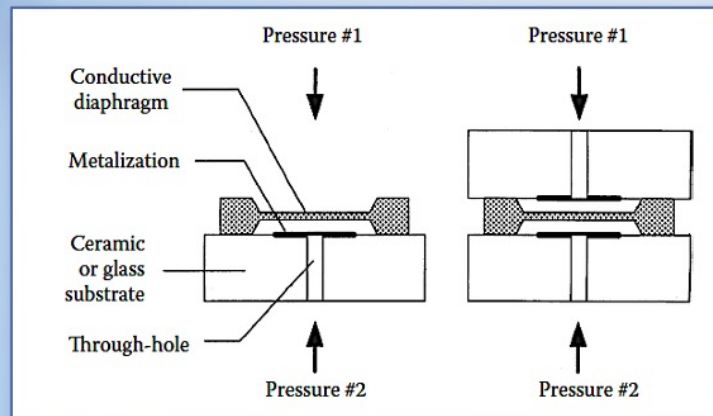
Na gornjim slikama prikazane su neke od mogućnosti korišćenja induktivnih pretvarača za linearna i ugaona pomjeranja u kombinaciji sa *Bourdon*-ovom cijevi "C" i uvijenog tipa. Donja slika predstavlja pretvarač sa debelom membranom od feromagnetnog materijala. Usljed razlike pritiska u komorama dolazi do pomjeranja membrane, što se mjeri diferencijalnim induktivnim pretvaračem. U poređenju sa potencijometarskim manometrima, manometri sa induktivnim pretvaračima imaju bolju tačnost i duži vijek trajanja, ali zahtijevaju složeniju instrumentaciju.

VRP (VARIABLE RELUCTANCE PRESSURE) SENZORI



Kada se mjere mali pritisci, otklon dijafragme može da bude veoma mali. U tom slučaju, upotreba mjernih traka nije pogodna zbog veoma malog izlaznog signala. Jedno od rješenja, pogotovo pogodno za niske pritiske, jeste VRP (*Variable Reluctance Pressure*) senzor. Koristi se magnetno provodna dijafragma kako bi se mijenjala reluktansa magnetnog kola, slika. Deformacijom dijafragme mijenja se širina vazdušnog procjepa, a samim tim i reluktansa kola i odgovarajuća induktivnost.

KAPACITIVNI SENZORI PRITISKA



Pomoću kapacitivnih senzora se mogu ostvariti mjerenja pritiska visoke tačnosti. Opseg pritisaka koji se mogu mjeriti kreće se od veoma niskih reda 10^{-3} Pa do visokih 10^7 Pa. Pogotovo su pogodni za mjerenje niskih pritisaka. Princip kapacitivnog senzora pritiska je prikazan na slici. Metalna ili poluprovodnička dijafragma služi kao element osjetljiv na promjenu pritiska istovremeno predstavljajući jednu elektrodu kondenzatora. Druga elektroda je statična i obično je u pitanju depozicija metala na staklenoj ili keramičkoj podlozi. Pod uticajem promjene pritiska, dijafragma se pomjera, što dovodi do promjene ekvivalentne kapacitivnosti. Kod diferencijalnih kapacitivnih senzora, razlika pritisaka djeluje na centralnu elektrodu u formi dijafragme, dok su spoljašnje elektrode statične, slika. Jedna kapacitivnost se povećava, druga se smanjuje, dok se istovremeno vrši temperaturna kompenzacija, ostvaruje bolja linearnost i veća osjetljivost. Kod kapacitivnih senzora deformacija dijafragme i odgovarajuća promjena kapacitivnosti može da bude i do 25 %, što je veoma značajno kada su u pitanju mjerenja niskih pritisaka. Naime, prilikom mjerenja niskih pritisaka može doći do slučajne nagle promjene pritiska, što neće oštetiti senzor. Ipak, linearna zona prenosne karakteristike je veoma uska.

Velika osjetljivost mjerenja postiže se konverzijom kapacitivnosti u frekvenciju.

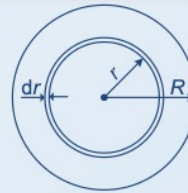
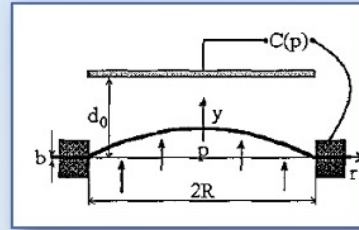
KAPACITIVNI SENZORI PRITISKA

$$y = \frac{p}{4M}(R^2 - r^2), y_{max} \ll R$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{R^2 \pi}{d_0}$$

$$dC = \epsilon_0 \frac{2\pi r dr}{d_0 - y} = \epsilon_0 \frac{2\pi r dr}{d_0 \left(1 - \frac{y}{d_0}\right)} \approx \epsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr$$

$$C = \int_0^R dC = \epsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr$$



Kapacitivni senzor za mjerenje pritiska sa tankom membranom prikazan je na slici. Tanka membrana zategnuta je po svom obimu radijalnom silom čija podužna vrijednost iznosi M . Pod dejstvom pritiska membrana se deformiše tako da dobija oblik dijela površine lopte. Pri manjim pritiscima deformacija membrane y na udaljenosti r od centra data je izrazom:

$$y = \frac{p}{4M}(R^2 - r^2),$$

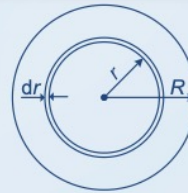
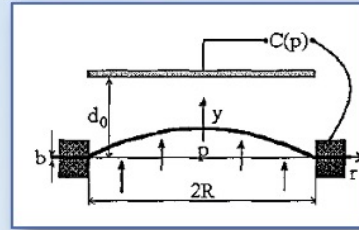
pri čemu treba da bude ispunjen uslov $y_{max} \ll R$.

Kapacitivni senzor sa tankom membranom sastoji se od tanke membrane kao pokretne ploče i od fiksne ploče postavljene na rastojanju d_0 od membrane, slika. Pretpostavljajući da je polje homogeno, za kapacitivnost elementarnog prstena membrane poluprečnika r i debljine dr važi:

$$dC \approx \frac{\epsilon_0 2\pi}{d_0} \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr$$

KAPACITIVNI SENZORI PRITISKA

$$\begin{aligned}C &= \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr \\&= \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{p R^2}{4M d_0} - \frac{p r^2}{4M d_0}\right) r dr \\&= \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \left(\frac{R^2}{2} + \frac{p R^4}{8M d_0} - \frac{p R^4}{16M d_0}\right) \\&= \varepsilon_0 \frac{\pi R^2}{d_0} \left(1 + \frac{p R^2}{4M d_0} - \frac{p R^2}{8M d_0}\right) = C_0 \left(1 + \frac{p R^2}{8M d_0}\right)\end{aligned}$$



Slijedi da kapacitivnost linearno zavisi od pritiska p :

$$C = C_0 \left(1 + \frac{p R^2}{8M d_0}\right)$$

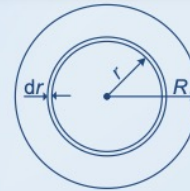
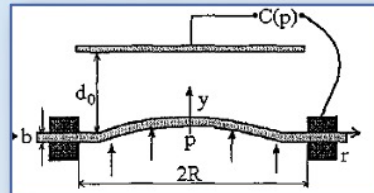
KAPACITIVNI SENZORI PRITISKA

$$y = \frac{3p}{16} \frac{1 - \nu^2}{E_Y b^3} (R^2 - r^2)^2$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{R^2 \pi}{d_0}$$

$$dC = \epsilon_0 \frac{2\pi r dr}{d_0 - y} = \epsilon_0 \frac{2\pi r dr}{d_0 \left(1 - \frac{y}{d_0}\right)} \approx \epsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr$$

$$C = \int_0^R dC = \epsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr$$



Najveći broj senzora za mjerenje pritiska sa ravnim membranama može se prikazati modelom debele membrane učvršćene po obimu, slika. Pomjeranje membrane pod dejstvom pritiska p dato je relacijom:

$$y = \frac{3p}{16} \frac{1 - \nu^2}{E_Y b^3} (R^2 - r^2)^2$$

gdje je ν Poisson-ov koeficijent, E_Y Young-ov modul elastičnosti materijala membrane, dok je b debljina membrane.

KAPACITIVNI SENZORI PRITISKA

$$C = \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr$$

$$= \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left[1 + \frac{1}{d_0} \frac{3p}{16} \frac{1-\nu^2}{E_Y b^3} (R^2 - r^2)^2\right] r dr = \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \int_0^R \left[1 + \frac{1}{d_0} \frac{3p}{16} \frac{1-\nu^2}{E_Y b^3} (R^4 - 2R^2 r^2 + r^4)\right] r dr$$

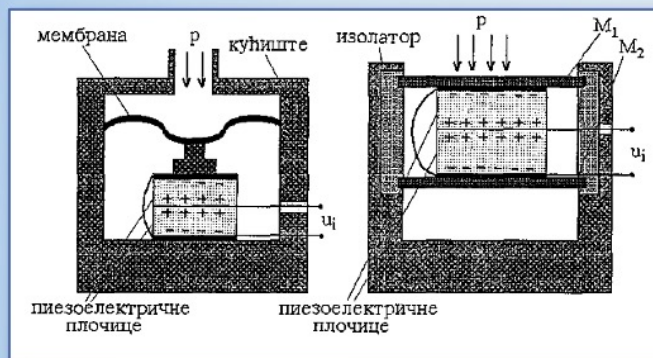
$$= \varepsilon_0 \frac{2\pi}{d_0} \left[\frac{R^2}{2} + \frac{1}{d_0} \frac{3p}{16} \frac{1-\nu^2}{E_Y b^3} \left(\frac{R^6}{2} - \frac{R^6}{2} + \frac{R^6}{6} \right) \right] = \varepsilon_0 \frac{\pi R^2}{d_0} \left(1 + \frac{1}{d_0} \frac{3p}{16} \frac{1-\nu^2}{E_Y b^3} \frac{R^4}{3} \right)$$

$$C = C_0 \left[1 + \frac{(1-\nu^2)R^4}{16d_0 E_Y b^3} p \right]$$

Slijedi da kapacitivnost linearno zavisi od pritiska p :

$$C = C_0 \left[1 + \frac{(1-\nu^2)R^4}{16d_0 E_Y b^3} p \right]$$

PIEZOELETRIČNI PRETVARAČI ZA DINAMIČKA MJERENJA PRITISKA



Kod piezoelektričnih pretvarača za mjerenje pritiska, pritisak na pločicu djeluje posredno, preko metalne membrane, slika. Na taj način se vrši mehanička zaštita i otklanja štetni uticaj agresivnih fluida na piezoelektričnu pločicu. Međutim, stvarni pritisak kojim membrana djeluje na pretvarač zavisi od krutosti membrane i drugih konstrukcionih faktora. Pogodnim izborom membrane i pločice ostvaruje se širok opseg, počev od pritisa bliskih atmosferskom pa do reda 1000 bari.

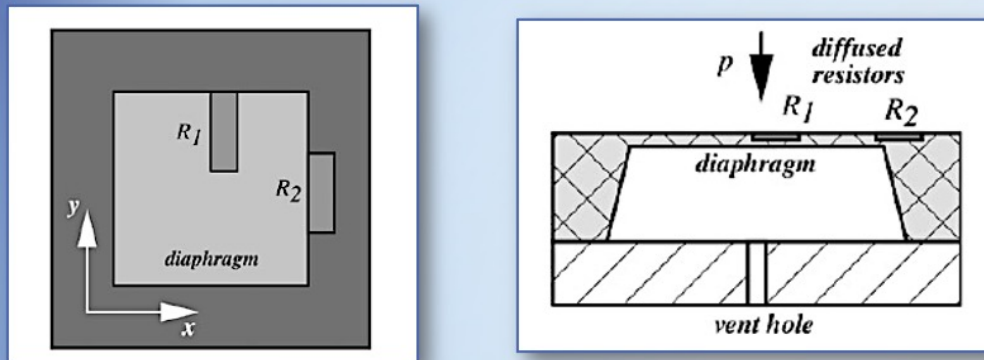
Piezoelektrične pretvarače za mjerenje pritiska odlikuju male dimenzije, visoka rezonantna učestanost od stotinak kHz, što ih čini pogodnim za dinamička mjerenja pri impulsnim promjenama pritiska, kao na primjer eksplozijama ili udarnim talasima u gasovima. Kao materijali se koriste najčešće kvarc, keramika na bazi barijum titanata i olovo cirkonata. Po svojoj konstrukciji, piezoelektrični pretvarači za mjerenje pritiska su slični odgovarajućim pretvaračima za mjerenje sile i ubrzanja.

Kod piezoelektričnih pretvarača za mjerenje pritiska koji rade u uslovima velikih vibracija, postavlja se problem osjetljivosti na ubrzanje. Naime, membrana i drugi elementi u kontaktu sa pločicom, pri ubrzanom kretanju djeluju određenom silom na pločicu izazivajući signal smetnje. U tu svrhu preduzimaju se posebne konstrukcije mjere koje smanjuju uticaj ubrzanja na mjerenje pritiska. Jedno od takvih rješenja

prikazano je na slici desno. Piezoelektrična pločica je prednapregnuta između dvije jednake membrane M_1 i M_2 . Na membranu M_1 djeluje spoljašnji pritisak, dok se membrana M_2 koristi za kompenzaciju uticaja vibracija. Naime, pri vibracijama obje membrane osciluju u fazi ne izazivajući dodatno naprezanje piezoelektrične pločice. Primjenom kompenzacione membrane M_2 smanjuje se osjetljivost pretvarača oko dva puta u odnosu na slučaj kada se pločica oslanja na krutu podlogu.

Piezoelektrični pretvarači se koriste i za mjerenje pritiska pri visokim temperaturama pri čemu se vrši vodeno hlađenje.

PIEZOREZISTIVNI SENZORI PRITISKA



Piezorezistivni senzori (mjerne trake) se najčešće koriste za mjerenje pritiska. Mjerna traka može direktno da se zalijepi na dijafragmu ili da se nanese depozicijom u vidu filma na površinu dijafragme. Najčešće se koriste integrisane mjerne trake koje se u procesu proizvodnje integrišu u samu dijafragmu.

Senzor pritiska sa silicijumskom dijafragmom prikazan na slici lijevo sastoji se od tanke membrane elastičnog elementa i piezorezistivnog mjernog otpornika realizovanog difuzijom. Zahvaljujući veoma dobrim elastičnim svojstvima kristalnog silicijuma, ne dolazi do trajnih oštećenja, niti histerezisa, čak ni pod uticajem snažnog statičkog pritiska.

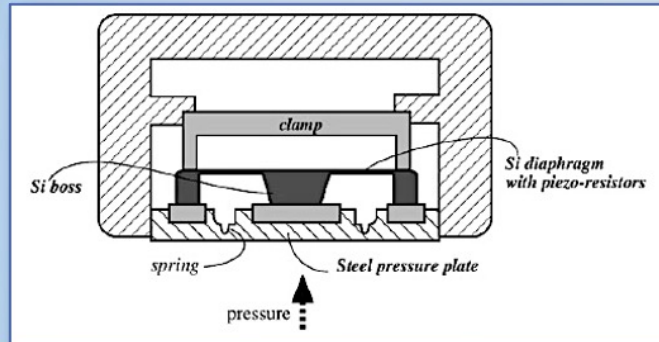
Kada se poluprovodnički otpornik nominalne otpornosti R izloži naprezanju, piezorezistivni efekat dovodi do relativne promjene otpornosti:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t$$

gdje su π_l i π_t su piezorezistivni koeficijenti poluprovodnika u longitudinalnom i transferzalnom pravcu, dok su σ_l i σ_t odgovarajuća mehanička naprezanja.

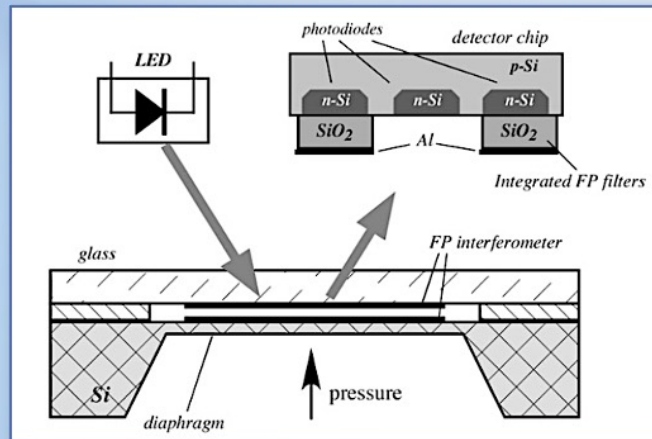
Koeficijenti π_l i π_t zavise od orijentacije otpornika na Si kristalu. Promjena otpornosti je proporcionalna naprezanju, a samim tim i pritisku. Otpornici se pozicioniraju tako da imaju π_l i π_t koeficijente suprotnog polariteta, pa se i otpornosti mijenjaju u skladu sa tim (otpornik R_1 se isteže, dok se otpornik R_2 skraćuje). Ostale periferijske komponente, kao što su otpornici za temperaturnu kompenzaciju, su raspoređeni van membrane kako ne bi bili izloženi deformaciji.

PIEZOREZISTIVNI SENZORI PRITISKA



Dijafragma (membrana) piezorezistivnih senzora je uglavnom veoma tanka reda 1 μm , pa je njena mehanička otpornost ograničena za maksimalnu vrijednost primijenjenog pritiska. Iz tog razloga je za mjerenje većih pritisaka potrebno uvesti sloj za skaliranje pritiska. Na primjer, za mjerenje pritiska u uslovima visokih temperatura i pritiska preko 200 bari, koristi se specijalno kućište sa čeličnim slojem za skaliranje pritiska kako bi se zaštitio čip. Visoki pritisak izvija čelični panel sa relativno malim pomjerajem u centralnom dijelu koji je povezan sa Si boss-om. Si boss je mehanička ekstenzija Si dijafragme i izvija se prema gore. Faktor skaliranja se kontroliše oprugama oko čeličnog panela.

OPTOELEKTRONSKI SENZORI PRITISKA

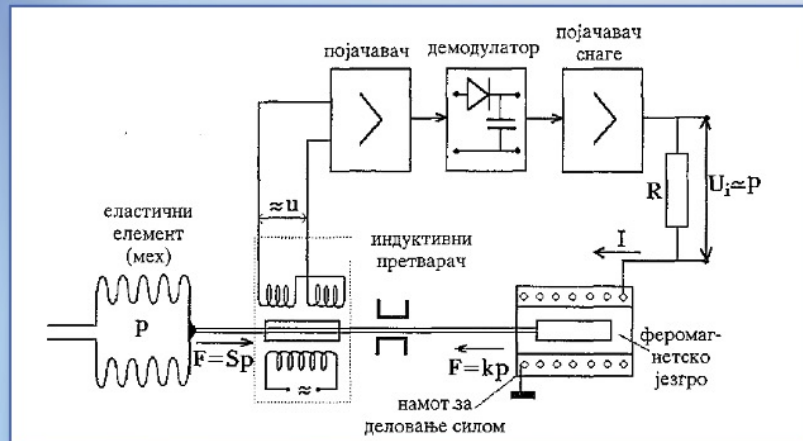


Pojednostavljena šema jednog tipa FP senzora pritiska je prikazana na slici. Senzor se sastoji od pasivnog optičkog čipa sa dijafragmom, LED-a i čipa detektora. Čip sa dijafragmom je sličan kapacitivnom senzoru pritiska, osim što je kondenzator zamijenjen optičkom šupljinom koja formira *Fabry-Perot* interferometar. Kristalna dijafragma je sa donje strane prekrivena metalnim slojem, dok je stakleni sloj sa slojem metala sa gornje strane. Staklo je odvojeno od silikonskog čipa procjepom širine w . Dva metalna sloja formiraju FP interferometar sa pokretnim ogledalom osjetljivim na pritisak (na dijafragmi) i fiksnim polu-transparentnim ogledalom (na staklu). Detektor čip sadrži tri fotodiode. Dvije od njih su prekrivene integrisanim FP filterima.

Princip rada senzora se bazira na mjerenju modulacije talasne dužine reflektovane i propuštene svjetlosti u zavisnosti od širine w FP šupljine. Refleksija i transmisija kroz šupljinu je gotovo periodična funkcija inverzne vrijednosti talasne dužine svjetlosti sa periodom koja je jednaka $1/2w$.

Čip detektor radi kao demodulator generišući električni signal koji je mjera primijenjenog pritiska.

SERVOMANOMETRI



Servomanometri rade na principu kompenzovanja deformacije elastičnog elementa izazvane pritiskom. Na taj način se elastični element praktično ne pomjera što otklanja uticaj nelinearnosti i mehaničkog histerezisa, pa se ostvaruje veća tačnost nego kod uobičajenih elastičnih pretvarača. Na slici je prikazana blok šema servomanometra.

Kao elastični senzor pritiska koristi se mijeh za čiji je izlazni kraj pričvršćen metalni štap. Na njegovoj sredini se nalazi jezgro diferencijalnog induktivnog pretvarača. Na kraju štapa je feromagnetski valjak koji predstavlja jezgro solenoida. Kada kroz solenoid protiče struja, javlja se elektromagnetna sila koja nastoji da jezgro održava u središtu, gdje je fluks maksimalan. Pri nominalnom pritisku jezgro induktivnog pretvarača i jezgro solenoida nalaze se u simetričnom tj. u ravnotežnom položaju.

Pri porastu mjenog pritiska, mijeh teži da se istegne i da mehanički dio sistema pomjeri udesno. Jezgro induktivnog pretvarača se malo pomjera iz simetričnog položaja, pa se dobija napon neravnoteže u . Ovaj signal se pojačava, demoduliše i vodi na ulaz pojačavača snage. Struja sa izlaza pojačavača snage prolazi kroz solenoid usljed čega se javlja magnetska sila koja teži da vrati jezgro solenoida u ravnotežni položaj. Koeficijent pojačanja je veliki pa se ostvaruje jaka negativna povratna sprega

koja teži da signal greške svede na nulu. To znači da se mehanički sistem praktično ne pomjera iz početnog položaja, što donosi gore navedene prednosti u odnosu na uobičajene senzore pritiska. Pritisak p je srazmjeran struji solenoida odnosno naponu na rednom otporniku R , $U_i=RI$.

MJERENJE VRLO VISOKIH PRITISAKA POMOĆU OTPORNIH PRETVARAČA

$$\sigma_x = \sigma_y = -p, \sigma_z = 0$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{2\nu p}{E_Y} + 2 \frac{p}{E_Y} (1 - \nu)$$

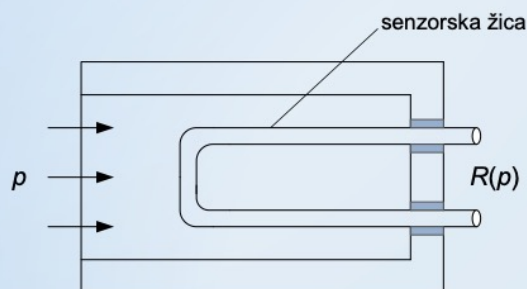
$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\sigma_x}{E_Y} (1 - \nu) = \frac{\sigma_y}{E_Y} (1 - \nu)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{p}{E_Y}$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\Delta r}{r} = -\frac{p}{E_Y} (1 - \nu)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l} = -\nu \frac{\sigma_x + \sigma_y}{E_Y} = \frac{2\nu p}{E_Y}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta r}{r}$$



Za mjerenje pritiska iznad 1000 bar od elastičnih pretvarača koriste se razne modifikacije *Bourdon*-ove cijevi. Da bi cijev izdržala velika naprezanja njeni zidovi moraju biti debeli i skoro okruglog oblika. Ovakve *Bourdon*-ove cijevi imaju veliku krutost, odnosno malu osjetljivost. Radi povećanja osjetljivosti usvaja se veća dužina odnosno veći broj namotaja. Na taj način se mjere pritisci do oko 7000 bar. Za precizna apsolutna mjerenja pritiska iznad ovih vrijednosti koriste se otporni žičani pretvarači od legura manganin i zlato-hrom. Principijelna šema žičanog pretvarača za mjerenje vrlo visokih pritiska prikazana je na slici. Pretvarač se sastoji od žice na čiji omotač djeluje mjereni pritisak. Na bazu cilindra – žice, koji su izvan posude djeluje atmosferski pritisak. Žica je dakle izložena dvoosnom naprezanju duž x i y ose, dok je naprezanje u pravcu z tj. duž ose cilindra jednako nuli:

$$\sigma_x = \sigma_y = -p, \sigma_z = 0$$

Deformacije pri dvoosnom naprezanju iznose:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\sigma_x}{E_Y} (1 - \nu) = \frac{\sigma_y}{E_Y} (1 - \nu)$$

što znači da je relativna promjena poluprečnika žice:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\Delta r}{r} = -\frac{p}{E_Y}(1 - \nu)$$

Oba naprezanja, duž x i y ose, dovode do povećanja dužine žice po z osi:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l} = -\nu \frac{\sigma_x + \sigma_y}{E_Y} = \frac{2\nu p}{E_Y}$$

Relativna promjena otpornosti deformisane žice iznosi:

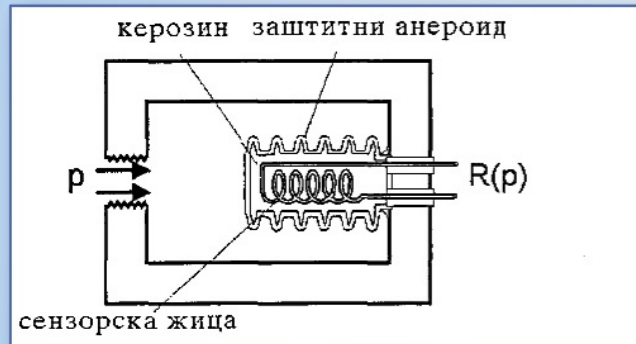
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta r}{r}$$

Na osnovu prethodnih relacija, dobija se da je promjena otpornosti žice:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{p}{E_Y}$$

Kako je promjena specifične otpornosti žice linearno srazmjerna pritisku, promjena otpornosti žice srazmjerna je pritisku.

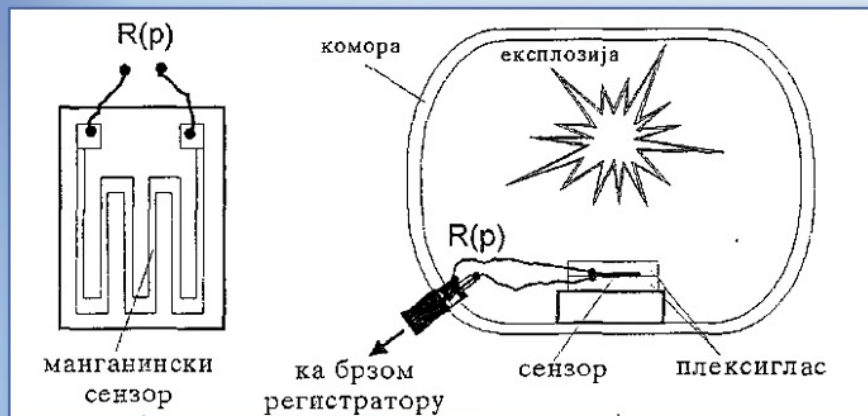
MJERENJE VRLO VISOKIH PRITISAKA POMOĆU OTPORNIH PRETVARAČA



Izgled pretvarača u uprošćenom obliku prikazan je na slici. Senzorska otporna žica nalazi se u zaštitnom aneroиду koji je napunjen kerozinom, čime se žica električno izoluje i štiti od korozivnog dejstva fluida u kome se vrši mjerenje. Aneroid ima tanke i elastične zidove, tako da je pritisak u njemu jednak sa pritiskom koji se mjeri.

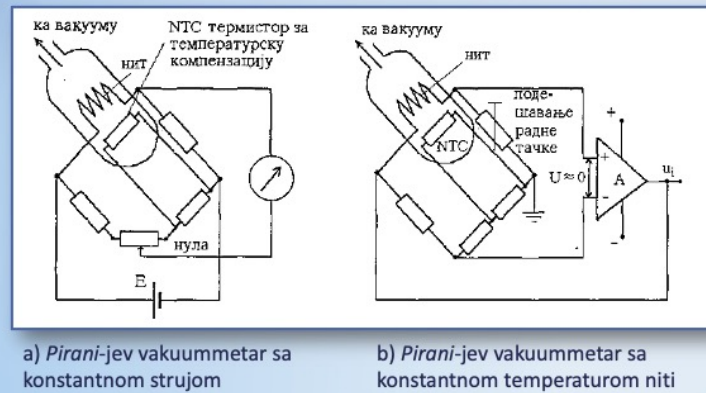
Iako je osjetljivost legure zlato-hrom manja nego manganina ipak se ona smatra podesnijom zbog oko 20 puta manjeg temperaturnog koeficijenta otpornosti. Ovo je značajno pri mjerenju brzih promjena pritiska jer usljed kompresije tečnosti, u aneroиду dolazi do porasta temperature. Vremenska konstanta žice je vrlo mala jer je određena prvenstveno prečnikom žice, pa se može smatrati da pretvarač praktično trenutno reaguje na promjene pritiska. Maksimalni pritisci ovog pretvarača su reda destina hiljada bari.

MJERENJE VRLO VISOKIH PRITISAKA POMOĆU OTPORNIH PRETVARAČA



Na slici je prikazan senzor od manganinske folije namijenjen za jednokratno mjerenje pritiska pri eksploziji u ispitnoj čeličnoj komori. Senzor je od folije debljine oko $20 \mu\text{m}$, otpornosti 4Ω do 5Ω . Senzor je zalijepljen između dvije pločice od pлексигласа i smješten u komori u kojoj se ispituje eksplozivna naprava. Pritisak u komori se određuje na osnovu promjene otpornosti senzora. Za kratko vrijeme плексиглас prenosi pritisak na senzor i istovremeno ga štiti od visoke temperature.

MJERENJE NISKIH APSOLUTNIH PRITISAKA – VAKUUMA TERMIČKI VAKUUMMETRI



Mjerenje ekstremno niskih pritisaka je važno u proizvodnji poluprovodničkih komponenti, optičkih komponenti, hemiji, i mnogim industrijskim primjenama. Takođe je od vitalnog značaja za mnoga naučna istraživanja kao što je istraživanje svemira. Vakuum znači pritisak ispod atmosferskog, ali se najčešće odnosi na odsustvo pritiska gasa. Potpuni vakuum ne postoji.

Prethodno opisani manometri ograničeni su u oblasti niskog pritiska smanjenjem svoje osjetljivosti. *Bourdon*-ove cijevi, na primjer, mogu se koristiti do 10^3 Pa, dok se pomoću aneroidnih kutija ostvaruju mjerenja do 10 Pa. Od elastičnih pretvarača najnižu donju granicu imaju tanke membrane sa kojima se dosežu apsolutni pritisci do 0.1 Pa.

Živin manometar koji u domenu srednjih pritisaka predstavlja jedan od etalona ima donju granicu 10 Pa čemu odgovara visina stuba reda veličine 0.1 mm. Klipni manometri i manometri sa uronjenim zvonom mogu takođe mjeriti pritiske gasova niže od atmosferskih, pod uslovom da se u okolnom prostoru ostvari vakuum. Međutim, pritisak u tom evakuisanom prostoru mora takođe biti poznat, što znači da je potrebno primijeniti neki drugi vakuumetar.

Mjerenje vakuuma konvencionalnim senzorima pritiska nije efikasno. Izlazni signal bi

imao veoma malu vrijednost, uporedivu sa šumom. Specijalni vakuum senzori se oslanjaju na određena fizička svojstva molekula gasa kao što su termalna provodnost, viskoznost, jonizacija, koja se mijenjaju sa promjenom gustine gasa (pri niskim pritiscima).

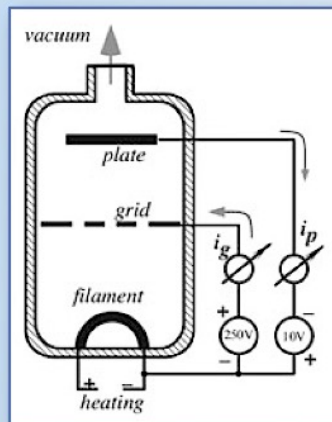
Pri pritiscima bliskim atmosferskom, tijelo zagrijano na (100-200) °C odaje toplotu u mirnom vazduhu pretežno provođenjem (kondukcijom) i strujanjem (konvekcijom). Prenos toplote provođenjem praktično ne zavisi od pritiska, sve dok se pritisak ne smanji do oko 10^3 Pa kada dolazi do promjene mehanizma odavanja toplote. Prenos toplote konvekcijom postaje zanemarljivo mali, dok koeficijent toplotne provodnosti opada sa smanjivanjem pritiska. Dakle, brzina odvođenja toplote pri smanjivanju pritiska opada. Ako se posmatra žica koja se zagrijava stalnom strujom, njena temperatura a time i otpornost raste uporedo sa smanjivanjem pritiska. Ovo čini fizičku osnovu rada termičkih vakuummetera od kojih su najpoznatiji *Pirani*-jev i vakuummetar sa termoparom.

Smanjenje koeficijenta toplotne provodnosti sa opadanjem pritiska objašnjava se povećanjem dužine slobodnog puta molekula. Toplotu sa žice na zidove cijevi prenose molekuli koji polazeći od žice direktno udaraju u zidove bez međumolekularnih sudara u gasu. Otuda je brzina odvođenja toplote obrnuto srazmjerna koncentraciji molekula, odnosno pritisku.

Elementarna šema *Pirani*-jevog vakuummetera sa konstantnom strujom prikazana je na slici. Pretvarač je ugrijana volframska nit uključena u most. Radi temperaturne kompenzacije u suprotnu granu mosta spojen je NTC termistor paralelno sa stalnim otpornikom. NTC termistor, koji ima zanemarljivo samozagrijavanje, smješten je u vakuumu u blizini niti, tako da prati temperaturne promjene okoline. Zbog suprotnog temperaturnog koeficijenta otpornosti termistora u odnosu na nit, dolazi do kompenzacije uticaja temperaturnih promjena.

Na drugoj slici prikazan je tip *Pirani*-jevog vakuummetera na principu konstantne temperature ugrijane niti. Most se napaja izlaznim naponom diferencijalnog pojačavača čiji ulazi su spojeni na izlaz mosta. Zbog negativne povratne sprege i velikog pojačanja A , izlazni napon pojačavača se mijenja na taj način da se temperatura održava konstantnom, pri čemu most ostaje u ravnotežnom stanju. Ukoliko se, na primjer, pritisak smanji, temperatura niti (i otpornost) teži da poraste zbog smanjene brzine odvođenja toplote. Potencijal na + ulazu pojačavača se smanjuje a time se smanjuje i izlazni napon u_i . Na kraju prelaznog procesa, usljed manje struje zagrijavanja temperatura žice ostaje praktično nepromijenjena. Kao mjera pritiska koristi se izlazni napon pojačavača u_i . Vakuummetri sa konstantnom temperaturom imaju složeniju konstrukciju ali im je osjetljivost pri višim pritiscima veća od vakuumetara sa konstantnom strujom. Zavisnost pritiska od izlaznog signala je nelinearna.

MJERENJE NISKIH APSOLUTNIH PRITISAKA – VAKUUMA JONIZACIONI VAKUUMMETRI



Ispod granice od 10^{-2} Pa kao etaloni pritiska koriste se jonizacioni vakuummetri. Po svojoj konstrukciji podsjećaju na elektronske cijevi. Osnovni djelovi jonizacionih vakuummetara su elektronski izvor sa ugrijanom ili hladnom katodom, elektroda za ubrzavanje elektrona i elektroda za sakupljanje pozitivnih jona. Elektroda za ubrzavanje elektrona nalazi se na pozitivnom naponu od nekoliko stotina volti, čime se dobijaju elektroni dovoljne energije da jonizuju molekule u razrijeđenom gasu čiji se pritisak mjeri. Primarni elektroni, kao i elektroni dobijeni jonizacijom, sakupljaju se na pozitivnoj elektrodi, dok se pozitivno naelektrisani molekuli – joni, prikupljaju na kolektorskoj elektrodi postavljenoj na negativni napon od desetak volti. Struja pozitivnih jona je srazmjerna koncentraciji molekula gasa, odnosno pritisku. Karakteristika jonizacionog manometra u oblasti nižih pritiska je linearna.

Jonizacioni vakuummetri za vrlo niske pritiske koriste pored električnog i magnetno polje, pa se elektroni umjesto pravolinijski kreću po helikoidalnoj putanji. Time se višestruko produžava dužina preleta od katode do anode, pa se povećava vjerovatnoća da na putu izvrše jonizaciju nekog molekula gasa. Ovakvim vakuummetrima dostižu se ekstremne granice od ispod 10^{-8} Pa.

LITERATURA

- Dragan Stanković, *Fizičko-tehnička mjerenja, Senzori*, Univerzitet u Beogradu, 1997 (poglavlje 6)
- Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*, 5th edition, Springer, 2016 (poglavlje 11)
- John G. Webster, Halit Eren, *Measurements, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press, 2nd edition, 2014 (poglavlja 39 i 40)

LINKOVI

- <https://www.youtube.com/watch?v=JnPSeEW-EeA>