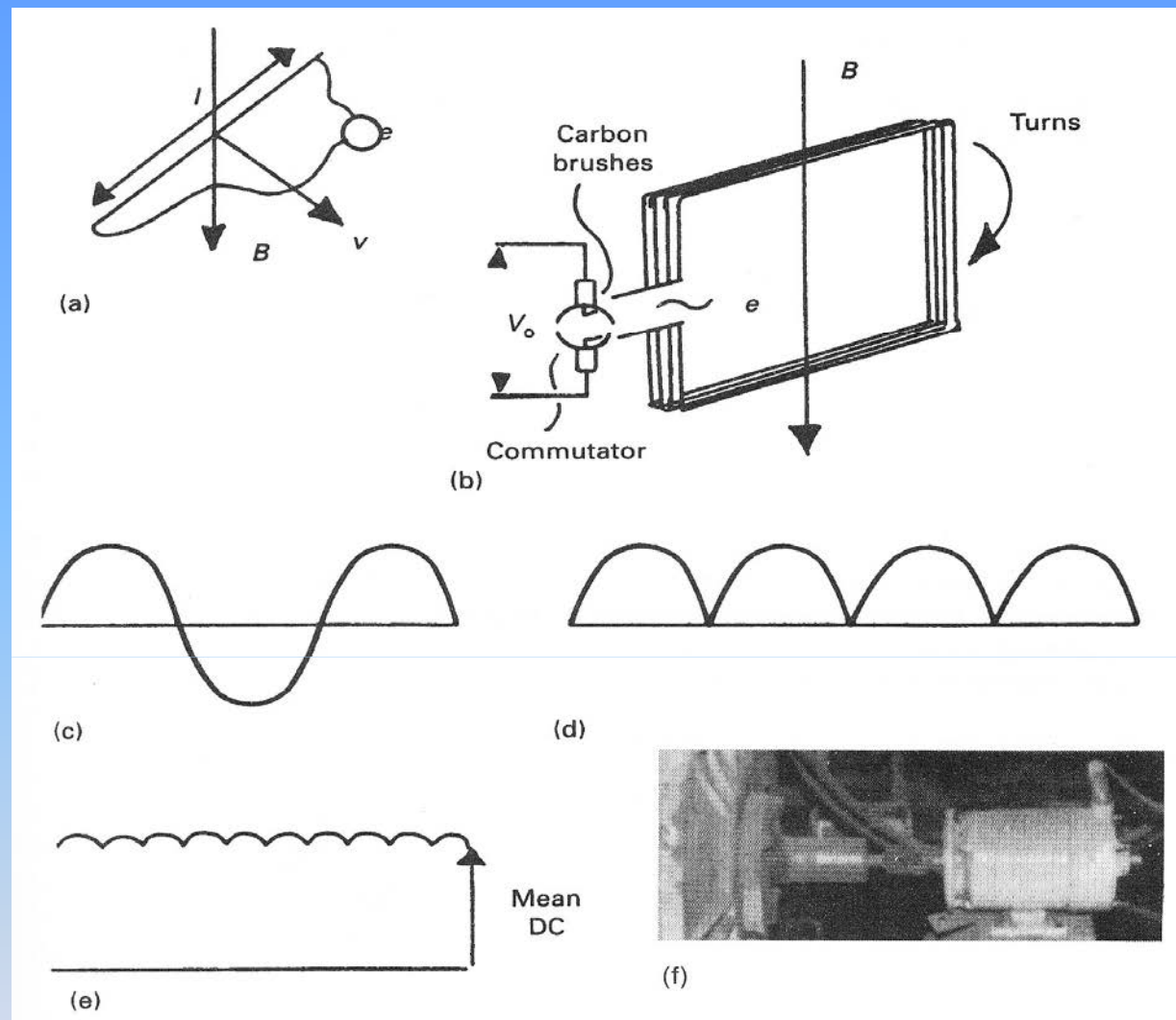


7. MJERENJE BRZINE

- Brzina je vrlo važna fizikalna veličina i definira se kao omjer pređenog puta i vremena utrošenog za to
- U SI sustavu jedinica je ms^{-1}
- Postoji nekoliko načina mjerenja brzine u industrijskim primjenama

Mjerenje brzine tahogeneratorom

- Mnogi procesi zahtjevaju mjerenje kutne brzine kao što je brzina osovine kod motora
- Najpoznatiji i najjednostavniji način pretvorbe izmjerene kutne brzine u linearnu vrijednost je tahogenerator
- Tahogenerator je ustvari jednostavni generator istosmjerne struje
- Temelj rada prikazan je na slici 93.



Slika 93. Tahogenerator: a) gibanje žice u magnetskom polju, b) gibanje zavojnice u magnetskom polju, c) inducirani napon zavojnice, d) izlazni napon pretvoren u istosmjernu struju pomoću komutatora (kolektora), e) izlazni napon tahogeneratora s više komutatora, f) fotografija tahogeneratora

- Na slici 93a). žica duljine l se giba s brzinom v okomito na magnetsko polje koje ima gustoću magnetskog toka B
- Napon e induciran u žici je: $e = Blv$
- Na slici 93b). zavojnica s n namota rotira u magnetskom polju B , a svaka strana pojedinog namota zavojnice koja je paralelna s osi rotacije induciraće napon prema gornjoj jednadžbi
- Ako se zavojnica nalazi pod kutom θ , inducirani napon će biti: $e = Blv \sin \theta t$
- Vrijedi da je $v = r\omega$, gdje je r – promjer zavojnice, a ω je kutna brzina (u s^{-1})
- Kut zavojnice θ se mijenja s vremenom kao ωt , gdje je t izraženo u sekundama
- Obe polovice zavojnice imaju jednak inducirani napon, pa je neto izlazni napon zavojnice:

$$e = 2Blr\omega n \sin \omega t$$
- To je sinusioda čija je frekvencija i amplituda proporcionalna kutnoj brzini ω kako je prikazano na slici 93c).

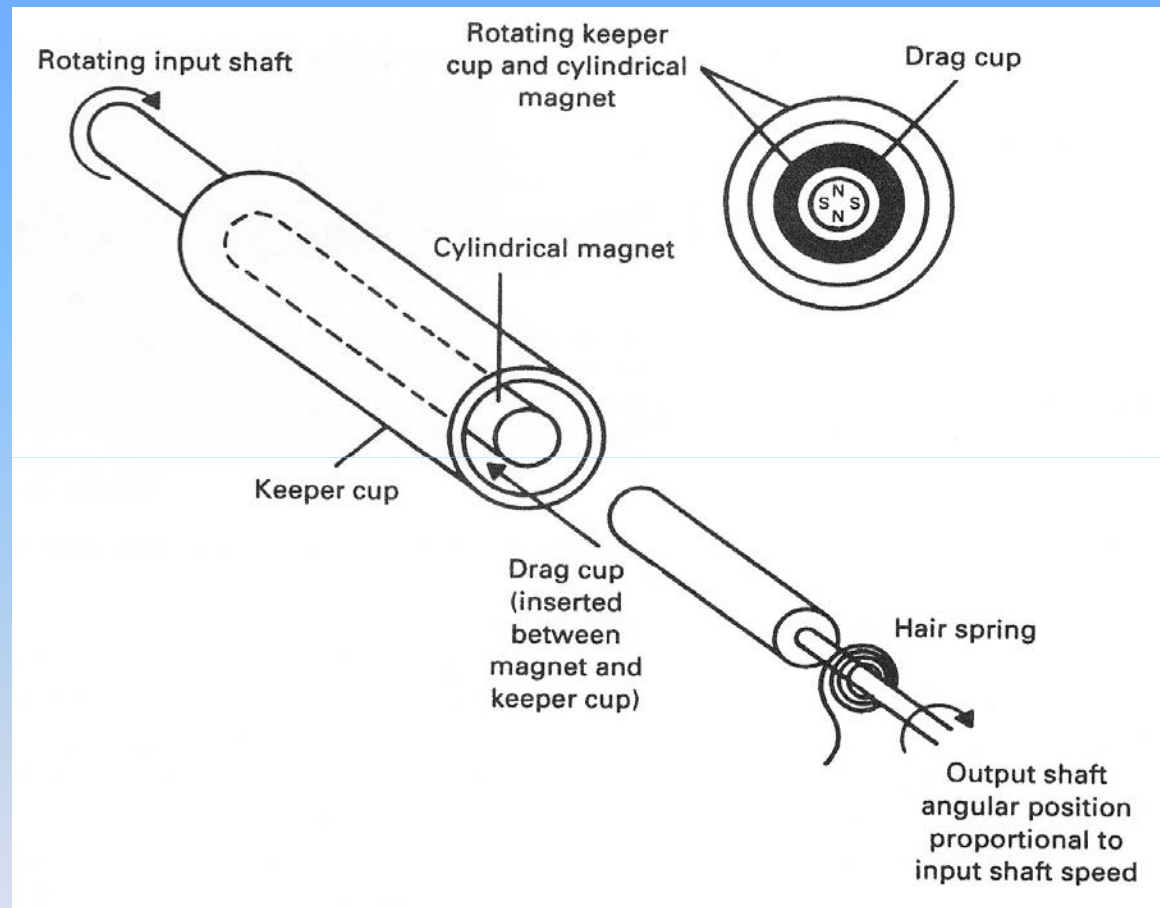
- Ako se koristi tahogenerator izmjeničnog napona, napon zavojnice može se mjeriti preko kliznih prstenova, iako je dosta pogodnije koristiti tahogenerator istosmjernog napona
- Komutator (kolektor) amplitudu napona koja prolazi kroz nulu okreće u suprotnom smjeru te daje ispravljeni istosmjerni izlazni napon koji u tom slučaju izgleda kao na slici 93d).
- Vršna amplituda istosmjernog napona je proporcionalna kutnoj brzini ali je i vrlo problematična velika valovitost izlaznog napona, a ta valovitost je ovisna o kutnoj brzini
- Navedeni problem se može riješiti korištenjem više zavojnica i komutatora koji onda daju izlazni istosmjerni napon kao na slici 93e).
- Najčešće se koristi 10 do 20 komutatora; što je veći broj upotrijebljenih komutatora, valovitost izlaznog napona je manja, ali tada to poskupljuje uređaj tahogeneratorsa
- Tahogeneratori ne induciraju veliki napon, otprilike 10 V po 1000 okretaja u minuti

Otporni valjak

- Otporni valjak pretvara kutnu brzinu u kutni pomak i najčešći je mjerni uređaj koji mjeri brzinu na automobilima i motorima
- Kutni pomak se dalje može pretvarati u električni signal kao izlazni signal pomoću bilo kojeg pretvornika kutnog pomaka
- Temelj rada otpornog valjka prikazan je na slici 94.
- Cilindrični magnet i kotveni valjak priključeni su na osovinu čija se brzina mjeri (ulazna osovina)
- Cilindrični magnet ima 4 pola kako je prikazano na presjeku na slici 94.

- Otporni valjak je izrađen od neferomagnetičnog metala (npr. bakra), spojen je na izlaznu osovinu i smješten između cilindričnog magneta i kotvenog valjka
- Kada se cilindrični magnet i kotveni valjak vrte u odnosu na otporni valjak, inducira se električni napon koji prelazi na otporni valjak
- Napon u djelovanju s magnetskim poljem izaziva zakretnu silu na otpornom valjku
- Uslijed zakretne sila otporni valjak će se gibati u istom smjeru kao i ulazna osovina
- Izlazna osovina je uklještena s spiralnom oprugom koja osigurava moment zakreta proporcionalan zakretanju osovine
- Izlazna osovina nalazi se pod kutom koji je posljedica suprotnih djelovanja momenta zakreta spiralne opruge i momenta zakreta induciranog rotacijom cilindričnog magneta

- Kut izlazne osovine proporcionalan je kutnoj brzini ulazne (mjerene) osovine

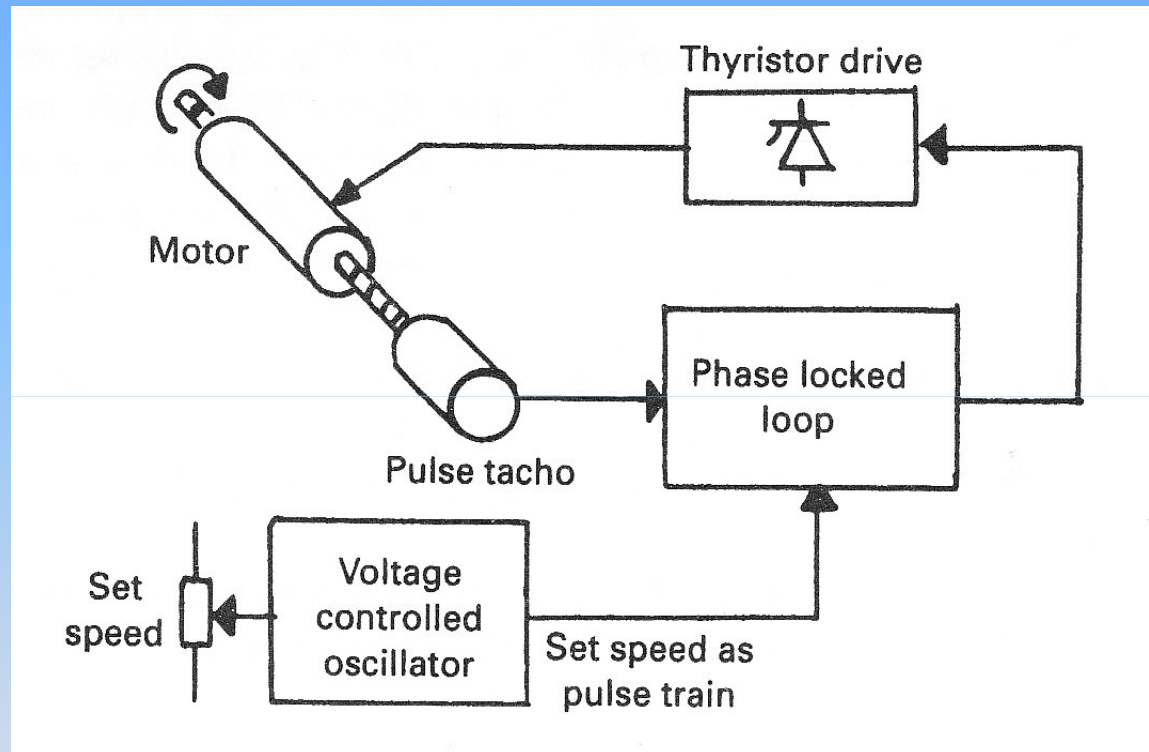


Slika 94. Otporni valjak

- Impulsni tahometar

- Impulsni tahometri su uređaji koji daju niz impulsa konstantne amplitude, a čija je frekvencija povezana s brzinom mjerene (ulazne) osovine
- Najčešće su specificirani prema broju impulsa po okretu ulazne osovine
- Npr. 180 impulsa po jednom okretu osovine daje izlaznu frekvenciju od 9kHz pri 3000 rpm (okretaja u minuti)
- Vrlo zanimljiva primjena impulsnih tahogeneratora je kod regulacije brzine istosmjernih elektromotora
- Na slici 95. prikazan je način regulacije brzine istosmjernih elektromotora
- Fazna petlja (*phase locked loop*) generira izlazni napon proporcionalan razlikama frekvencija između dva niza impulsa
- Signal postavljene brzine pretvara se u impulsne nizove pomoću oscilatora kontroliranog napona i ti impulsi se uspoređuju u faznoj petlji s impulsnim nizovima s tahogeneratora

- Izlazni signal iz fazne petlje koristi se kao signal povratne veze za regulaciju elektromotora
- Preciznost regulacije u ovom slučaju kreće se gotovo 100% (greška je 0,001%)



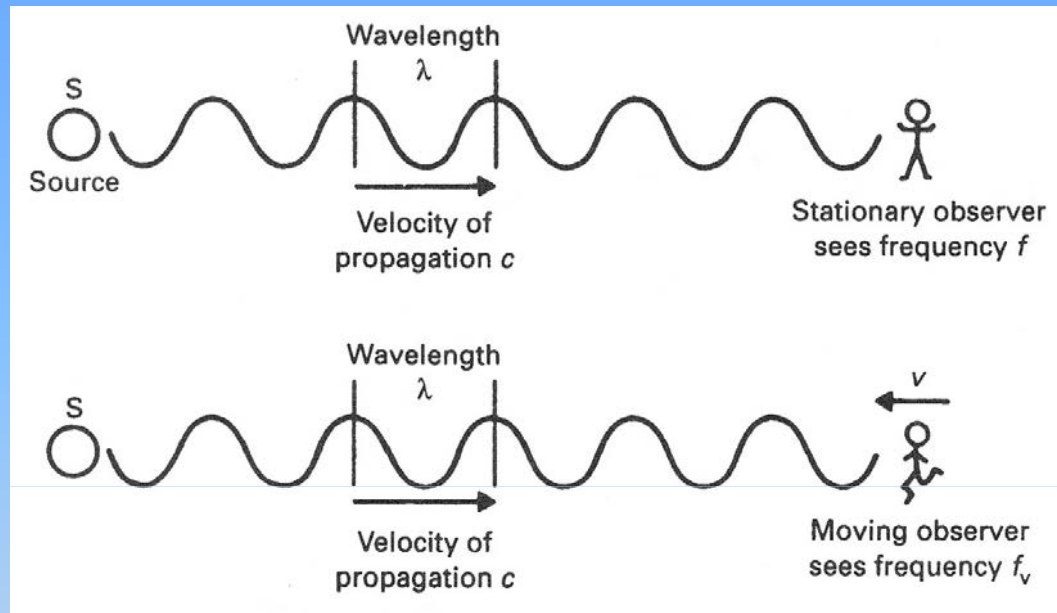
Slika 95. Regulacija pomoći impulsnog tahogeneratorsa

- Sustavi mjerenja s Dopplerovim efektom

- Dopplerov efekt se zbiva kada postoji relativno gibanje između izvora zvuka (ili elektromagnetskog zračenja) i objekta promatranja
- Na slici 96. izvor **S** emitira valove (zvuka ili elektromagnetskog zračenja) s frekvencijom **f**
- Ako je brzina rasprostiranja **c**, a valna dužina **λ**, vrijedi sljedeća veza: **f = c/λ**
- Promatrač u mirovanju će vidjeti valne linije frekvencije **f** koje dolaze u jedinici vremena tj. promatrana frekvencija biti će jednaka odaslanoj frekvenciji
- Ako se promatrač giba prema izvoru **S** određenom brzinom **v** kao na slici 96b). Svaka valna linija uočiti će se ranije, pošto je sada brzina rasprostiranja **c + v**
- Promatrana frekvencija je sada: **f_v = (c + v)/λ**, to jest frekvencija je viša
- Pomak odnosno porast frekvencije je:

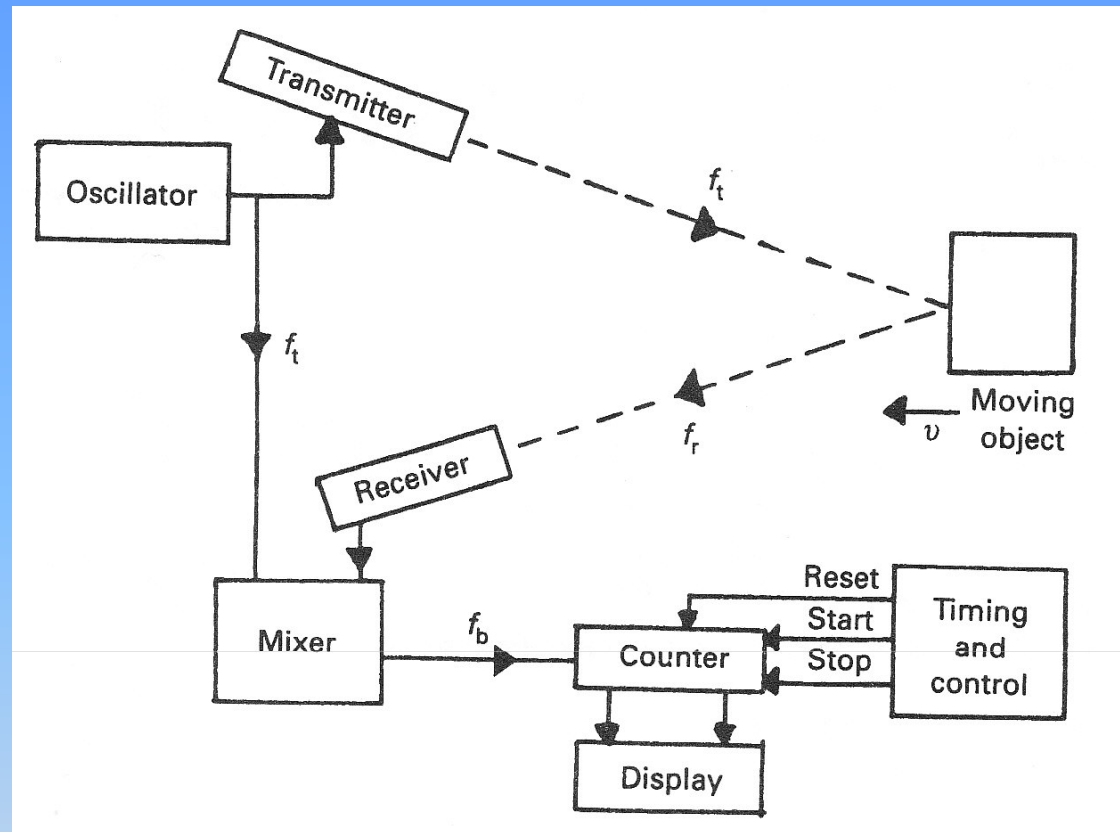
$$f_v - f = \frac{c+v}{\lambda} - \frac{c}{\lambda} = \frac{v}{\lambda}$$

- Prethodna jednađba pokazuje da je frekvencijski pomak proporcionalan relativnoj brzini i emitiranoj frekvenciji



Slika 96. Dopplerov efekt: a) promatrač u mirovanju, b) promatrač u gibanju

- Dopplerov efekt raste s relativnim gibanjem prema izvoru zvuka ili elektromagnetskog zračenja
- Dopplerov efekt omogućuje daljinsko mjerenje brzine (npr. brzina rotacije planeta)
- Praktičan način mjerenja brzina s Dopplerovim efektom prikazan je na slici 97.



Slika 97. Mjerenje brzine pomoću Dopplerova efekta

- Predajnik emitira zvuk ili elektromagnetsko zračenje frekvencije f_t s brzinom rasprostiranja c
- Objekt mjerenja se giba brzinom v , reflektira zvuk ili zračenje te sad ovaj zvuk ili zračenje ima frekvenciju f_r

- Dva Dopplerova frekvencijska pomaka se zbivaju jer objekt djeluje i kao promatrač u gibanju i kao izvor u gibanju, pa je:

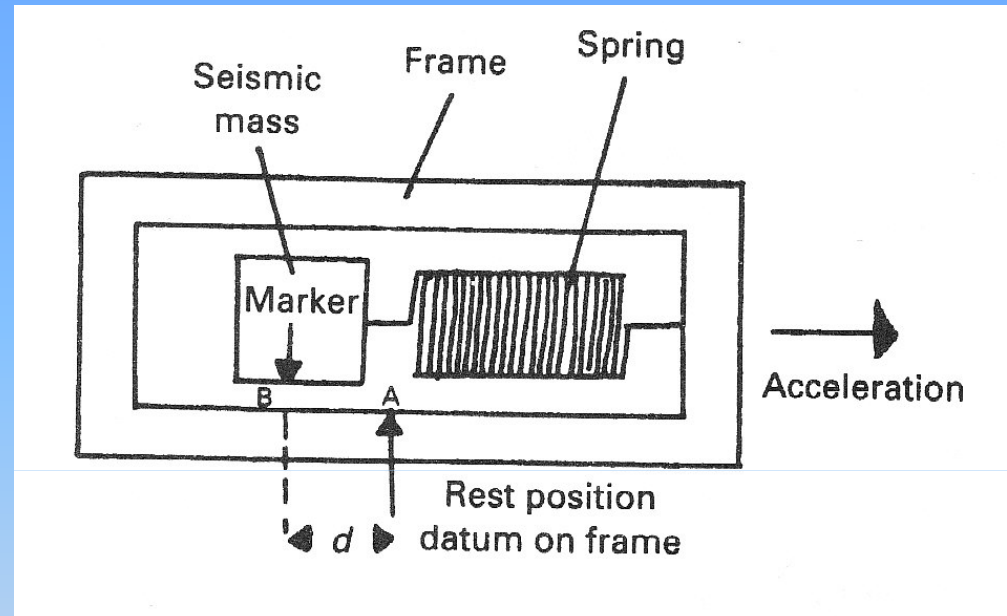
$$f_r - f_t = \frac{2f_t}{c} v$$

- Odašlana i primljena frekvencija se mješaju te daju impulsnu frekvenciju f_b , jednaku pomaku $f_r - f_t$
- Impulsna frekvencija f_b proporcionalna je brzini v gibajućeg objekta i može biti pretvorena u izlazni električni signal
- Npr. za radarski emitirani signal od 10 GHz koji putuje brzinom svjetlosti $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, i ako je brzina gibanja promatranog objekta 20 ms^{-1} , frekvencijski pomak izražen kao impulsna frekvencija je 1.333 kHz (može se čuti ljudskim sluhom)

MJERENJE UBRZANJA

- Ako na neko tijelo mase **M** djeluje sila **F** , tijelo će se ubrzavati ubrzanjem **a** (ms^{-2})
- Također tijelo koje ubrzava biti će izloženo sili (npr. pri kočenju sila pomiče tijelo iz sjedišta prema naprijed)
- Ta sila kojoj je izloženo tijelo prilikom ubrzanja proporcionalna je ubrzanju te se koristi za mjerenje samog ubrzanja
- Osnova mjerenja prikazana je na slici 98.
- Masa je pričvršćena oprugom krutosti **K** , te se u stanju mirovanja nalazi u položaju **A**
- Ako se tijelo ubrzava konstantnom veličinom ubrzanja **a** , masa je izložena sili
- Ta sila pomiče masu prema položaju **B** do trenutka dok se sila uslijed ubrzanja ne izjednači s silom krutosti opruge, te se tada gibanje mase zaustavlja u novom položaju **B**
- Pomak tijela je proporcionalan veličini ubrzanja

- Pomak mase se može mjeriti bilo kojim pretvornikom pomaka kao npr. potenciometrima ili linearnim pretvornicima pomaka (LVDT)

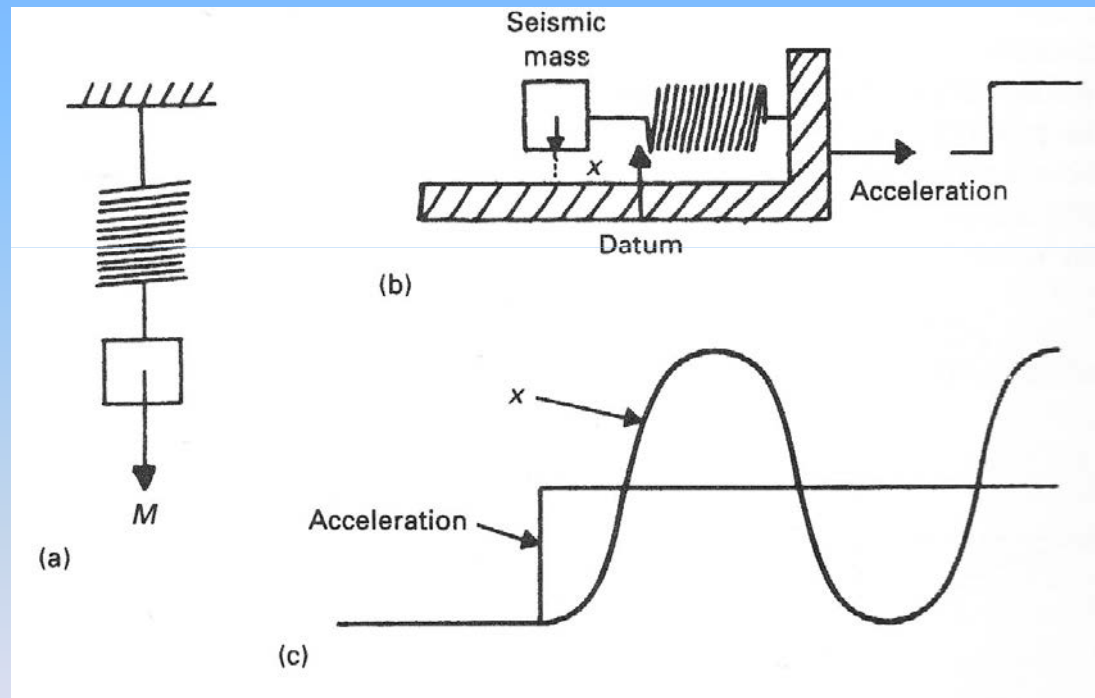


Slika 98. Mjerni uređaj za mjerenje ubrzanja mase

Sustavi drugog reda

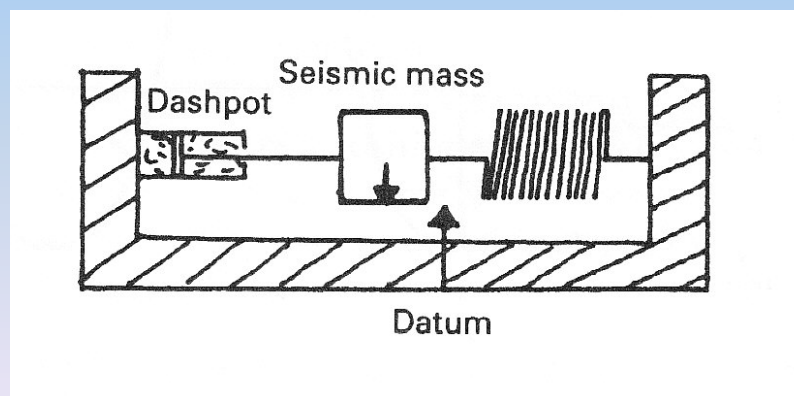
- Može se očekivati da će masa na slici 99a). nakon povlačenja prema dole i puštanja, oscilirati s amplitudama oscilacije koje se smanjuju, sve do povratka u prvobitni položaj

- Na slici 99b). prikazan je također jednostavni uređaj za mjerenje veličine ubrzanja kao i na slici 98.
- Uređaj u ovakvom obliku nije prikladan za točno mjerenje veličina ubrzanja jer se i kod ovakvog uređaja (kao i kod uređaja na slici 99a.) javljaju oscilacije gibanja uslijed djelovanja sile kao posljedice ubrzanja, te djelovanja trenja koje će smanjivati amplitude oscilacija



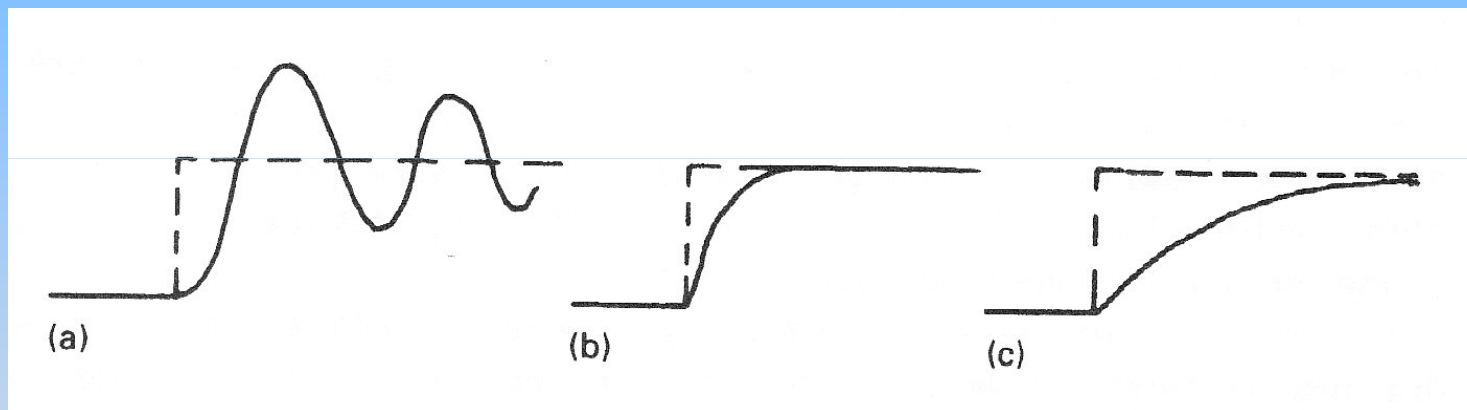
*Slika 99. Skokoviti odgovor akcelometra bez prigušenja: a) oscilirajuća masa
 b) akcelometar s skokovitom promjenom ubrzanja, c) izlazni signal akcelometra*

- Uređaji za mjerenje ubrzanja (akcelerometri) prikazani na slikama 98. i 99a). i b). su akcelerometri bez prigušivanja
- Problem oscilacije se može riješiti upotrebom uređaja za prigušivanje koji može biti obični prigušni uređaj s trenjem ili prigušni uređaj s viskoznom tekućinom (slika 100.)
- Prigušni uređaj s trenjem će eliminirati oscilacije ali će i izazvati pogrešku prijenosa signala
- Najpogodniji su prigušni uređaji s viskoznom tekućinom koji ne izazivaju nikakvu pogrešku a efikasno eliminiraju oscilacije uslijed sile ubrzanja
- Viskozne tekućine u ovim uređajima (najčešće ulje) formiraju uljni jastuk kao šok-apsorber za oscilacije, što je znatno efikasnije od obične sile trenja



Slika 100. Akcelerometar s prigušivanjem

- Faktori prigušenja b mogu biti različiti, pa se mogu kretati od $b < 1$, za neprigušene sustave, $b = 1$ za sustave kritičnog prigušivanja, pa do $b > 1$ gdje je sustav previše prigušen
- Ovisno o faktorima prigušenja i izlazni signali senzora se razlikuju
- Na slici 101. prikazani su izlazni signali za različite faktore prigušenja

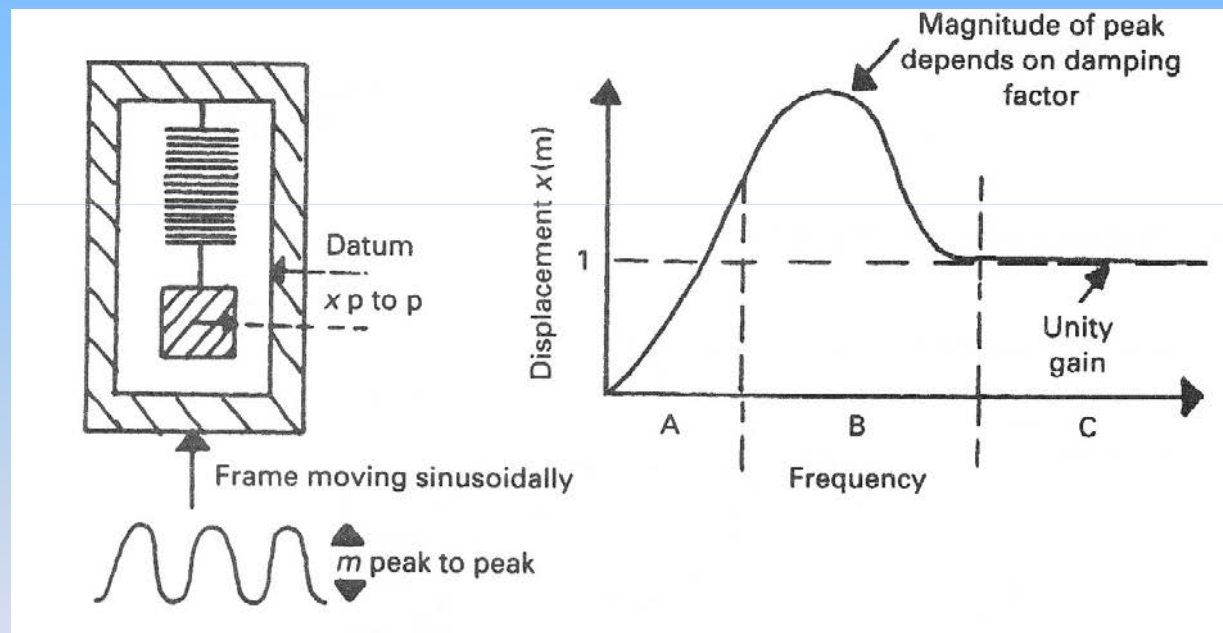


Slika 101. Rezultati prigušenja: a) neprigušen sustav, b) kritično prigušen sustav, c) previše prigušen sustav

- Iako bi se moglo zaključiti da je najidealniji kritično prigušen sustav, praksa je pokazala da blago neprigušen sustav ($b = 0.7$) daje najkraće vrijeme odgovora

MJERENJE VIBRACIJA

- Uređaji za mjerenje vibracija vrlo često se koriste za nadzor i zaštitu velikih postrojenja u kojima je prisutno kružno gibanje
- Rade na sličnim temeljima i kao akcelerometri, te je na slici 102. prikazano njihovo djelovanje



Slika 102. Temelj rada uređaja za mjerenje vibracija: a) shematski dijagram, b) frekvencijski izlazni signal

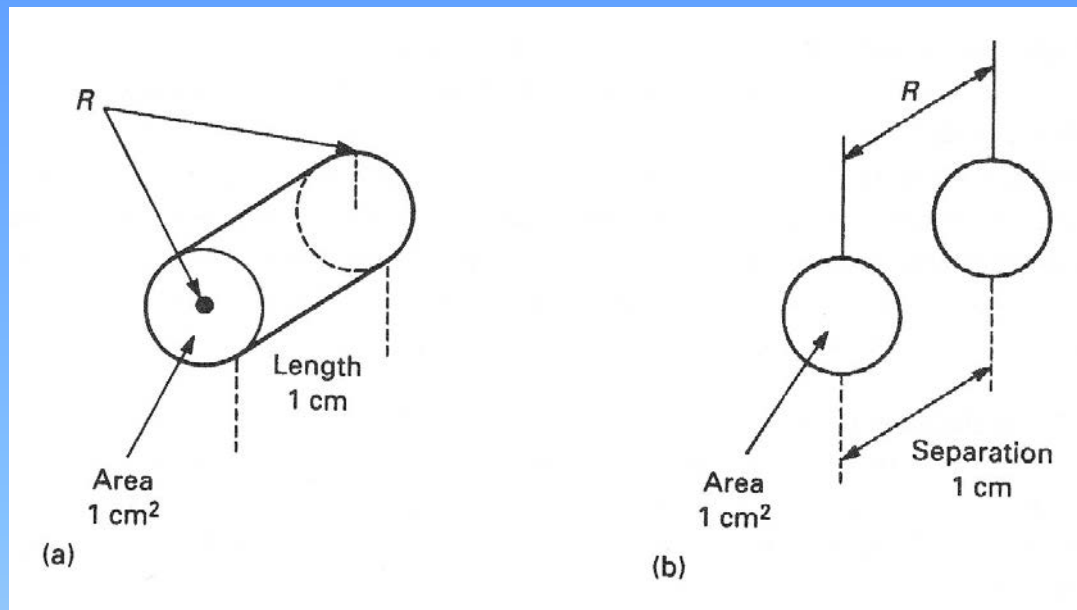
- Uređaj za mjerenje vibracija nalazi se u okviru (konstrukciji) koja je izložena sinusoidnom pomaku konstantne amplitude ali promjeljive frekvencije (slika 102a.)
- Veza između pomaka x i frekvencije prikazana je na slici 102b).
- U području A (102b.) uređaj djeluje kao akcelerometar, te amplituda pomaka raste zbog porasta ubrzanja koje posjeduje određenu frekvenciju
- S porastom frekvencije dolazi se u područje **B** gdje se zbiva najveći pomak mase (ovisan također i o faktoru prigušenja)
- Nakon toga slijedi područje **C** gdje nema više pomicanja mase u prostoru tj. masa ostaje u konstantnom položaju iako se okvir i dalje giba uslijed vibracija
- Pomak mase x u području **C** proporcionalan je pomaku okvira uslijed vibracija
- Uređaj za mjerenje vibracija konačno u području **C** djeluje kao senzor pomaka te je taj pomak proporcionalan frekvenciji i amplitudi vibracija
- Uređaji za mjerenje vibracija su maleni i male mase da se spriječi dodatno opterećivanje rotacijskih uređaja na koje su priključeni

UREĐAJI ZA ANALITIČKA MJERENJA

- Poznavanje kemijskog sastava plinova ili tekućina je važan dio regulacije velikog broja industrijskih procesa
- Ispitivanje udjela kisika i CO u dimnim plinovima može se koristiti u regulaciji plamenika na kotlovima i na taj način smanjivati potrošnju goriva

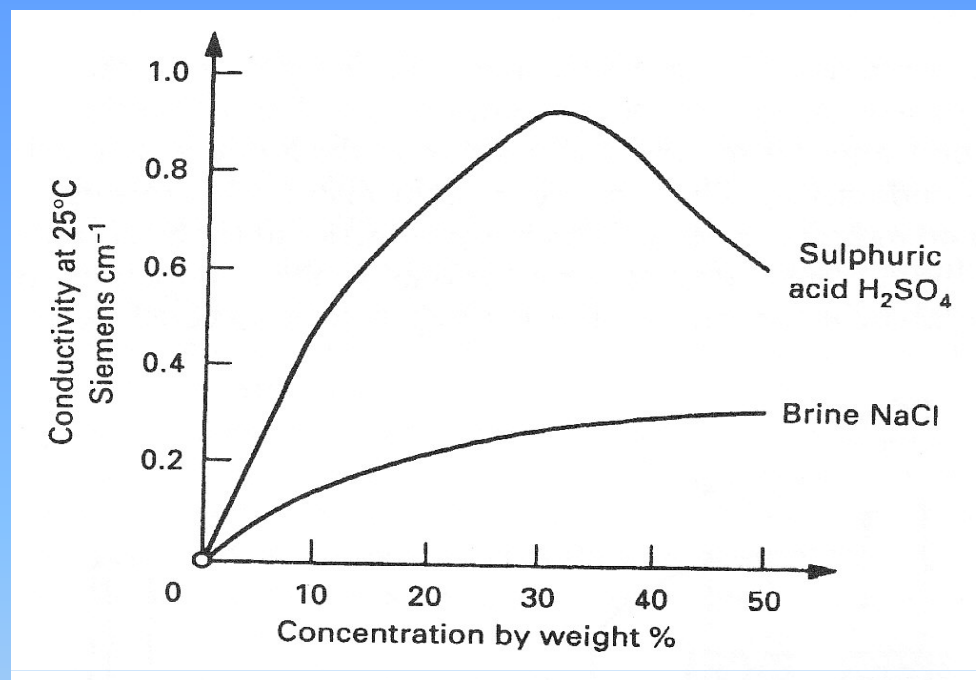
Vodljivost

- Za razliku od rasprostranjenog mišljenja, čista deionizirana voda je loš vodič elektriciteta i ima veliki električni otpor
- Svojstvo tekućine da vodi električnu struju određeno je brojem nabijenih iona
- Većina kiselih otopina ima veliki broj nabijenih iona i stoga vrlo lako provodi elektricitet tj. električnu struju
- Jedinica za električnu vodljivost je Siemens (S), pa otpor od 10 ohma ima vodljivost od 0.1 Siemens
- Vodljivost tekućine ili krutnine definirana je mjerenjem električnog otpora tvari dimenzija duljine 1 cm i presjeka 1 cm² (kao na slici 103.)



Slika 103. Definicija vodljivosti: a) krutina, b) tekućina

- Vodljivost raste s porastom površine promatranih uzoraka , a opada s povećanjem duljine tj. udaljenosti
- Iako teoretski potpuno čista voda ima jako malu vodljivost, voda uvijek dolazi s raznim otopljenim mineralnim tvarima i ostalim česticama što uzrokuje da obična voda relativno dobro provodi električnu energiju
- Vodljivost se povećava dodavanjem različitih kiselih otopina
- Vodljivost nekih otopina prikazano je na slici 104.



Slika 104. Povezanost vodljivosti i koncentracija kiselih otopina

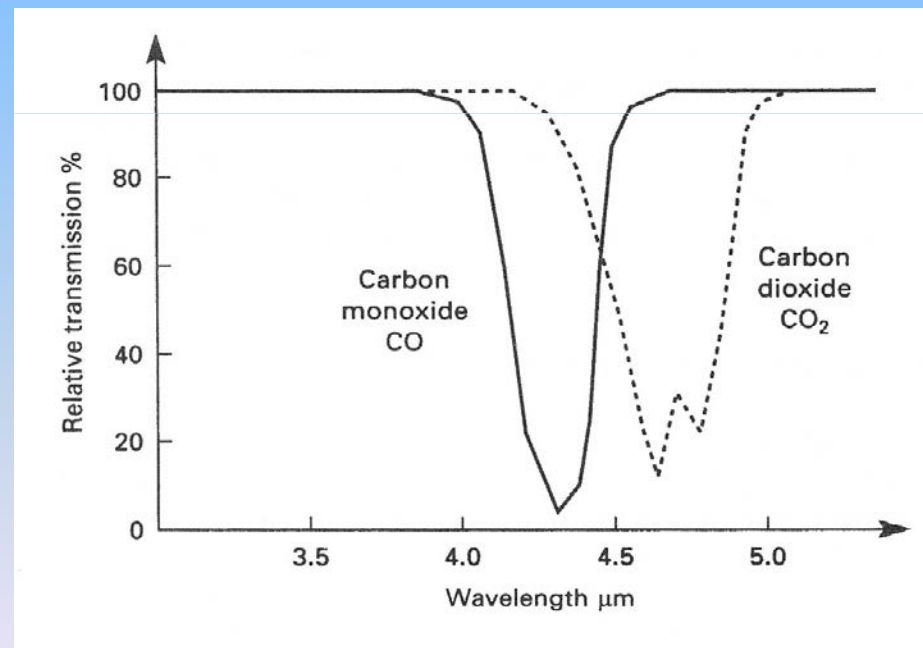
- Mjerenje vodljivosti izvodi se s dvije elektrode koje se urone u otopinu
- Izmjerena vodljivost ovisi o površinama elektroda i njihovoj udaljenosti u otopini
- Na elektrode se spaja izmjenična struja poznatog napona te se mjeri jakost struje između dvije uronjene elektrode
- Izmjerena promjena jakosti struje proporcionalna je stupnju vodljivosti

Analiza izgaranja

- Enorman porast cijene goriva te visoki ekološki zahtjevi postavili su pred proces izgaranja zahtjeve da se postigne što veća efikasnost izgaranja i što je manje moguća emisija štetnih plinova
- Zrak sadrži volumno 21% kisika i 79% dušika (teoretski)
- S potpunim izgaranjem sav ugljik u gorivu se pretvara u ugljični dioksid te je sadržaj ugljičnog dioksida u ispušnim plinovima oko 12%
- S nepotpunim izgaranjem osim ugljičnog dioksida stvara se i ugljični monoksid
- Efikasnost procesa izgaranja može se kontrolirati promatrajući koncentracije kisika, ugljičnog dioksida, ugljičnog monoksida i dušikovih oksida u ispušnim kolektorima
- Porast npr. sadržaja kisika u ispušnim plinovima signalizira da je pretičak zraka prevelik dok veliki sadržaj ugljičnog monoksida signalizira da je pretičak zraka premalen tj. nema dovoljno kisika za potpunu kemijsku reakciju izgaranja

Optička analiza

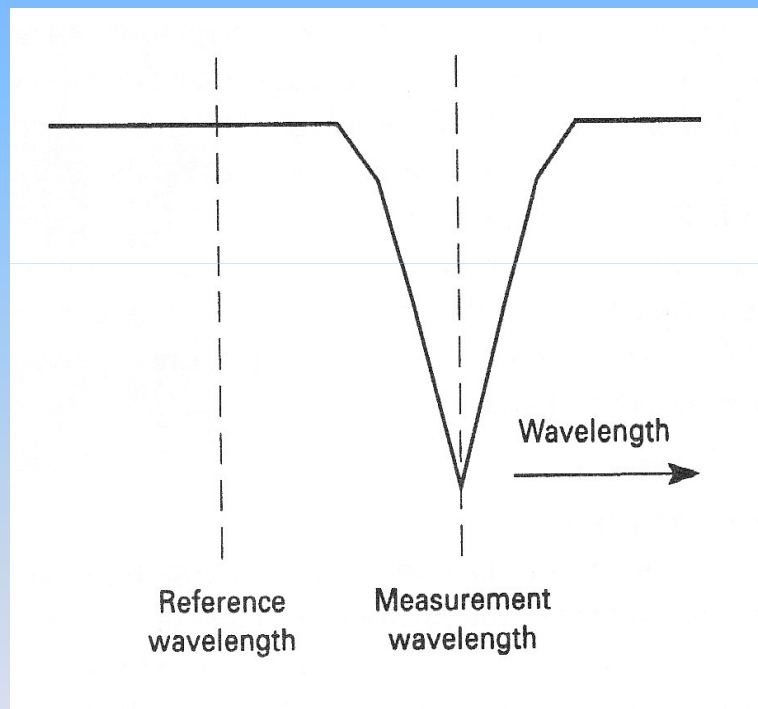
- Svaki kemijski element zadržava pojedine valne dužine svjetlost koje prolaze kroz njega
- Zemljina atmosfera (ozon) blokira većinu sunčevih radijacijskih zraka osim vidljivog svjetlosnog zračenja s valnim duljinama od 0.38 μm (ljubičasta) do 0.78 μm (crvena)
- Na slici 105. prikazan je dio apsorpcijskog spektra za ugljični dioksid i ugljični monoksid



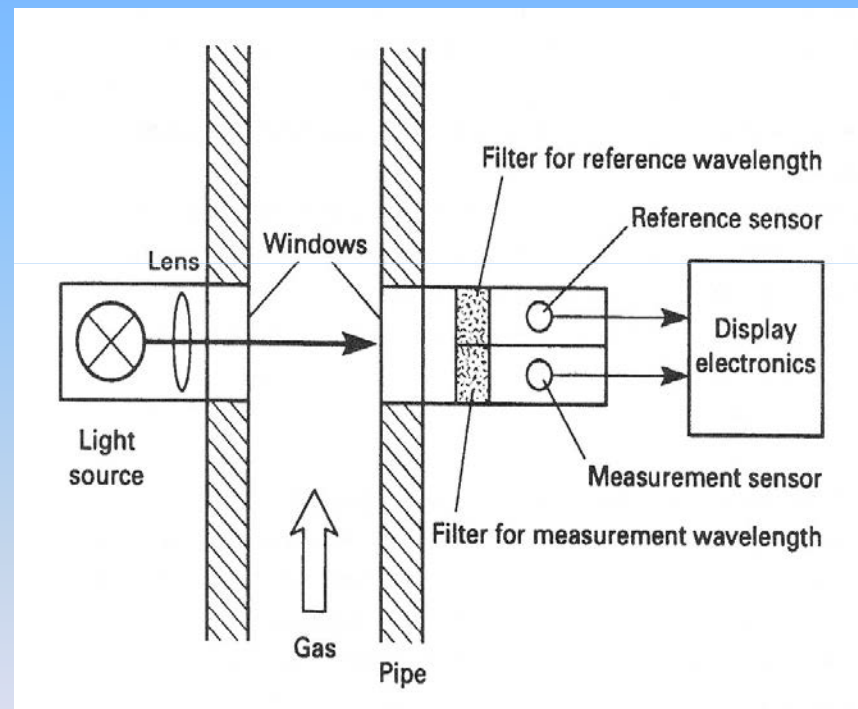
Slika 105. Apsorpcijski spektar CO₂ i CO

- Apsorpcijaki spektar i CO_2 i CO nalazi se u infracrvenom području
- Dijelovi spektra gdje je prolaz valova blokiran zove se **apsorpcijski opseg** plina
- Različiti dijelovi svjetlosnog spektra koriste se za različite plinove pa se tako infracrveni dijelovi spektra koriste za CO_2 i CO, vidljivi dijelovi spektra za dušične okside NO_x , a ultraljubičasti za sumporne okside
- Temelj rada optičkog analizatora prikazan je na slici 106.
- Izabiru se dvije valne dužine od kojih se prva zove referentna valna duljina te za tu valnu dužinu nema apsorpcije promatranog plina, niti bilo kojeg drugog plina
- Druga valna duljina naziva se mjerna valna duljina, te je locirana u apsorpcijskom opsegu specifičnom za promatrani plin
- Prikaz rada optičkog analizatora koji se primjenjuje u industriji dat je na slici 107.
- Uzorak promatranog plina prolazi kroz cijev a jednostruka svjetlosna zraka (infracrvena) prolazi poprečno po presjeku cijevi do dva detektora

- Svjetlosna zraka prvo prolazi kroz prvi filter koji propušta na senzor samo referentnu valnu duljinu, dok drugi filter propušta na senzor samo mjernu valnu duljinu
- Intezitet svjetlosti primljen na oba senzora ne ovisi samo o sastavu plinova već i od temperature plinova, intezitetu svjetlosne zrake, čistoći leća na obje strane cijevi



Slika 106. Valne duljine upotrijebljene u optičkom analizatoru

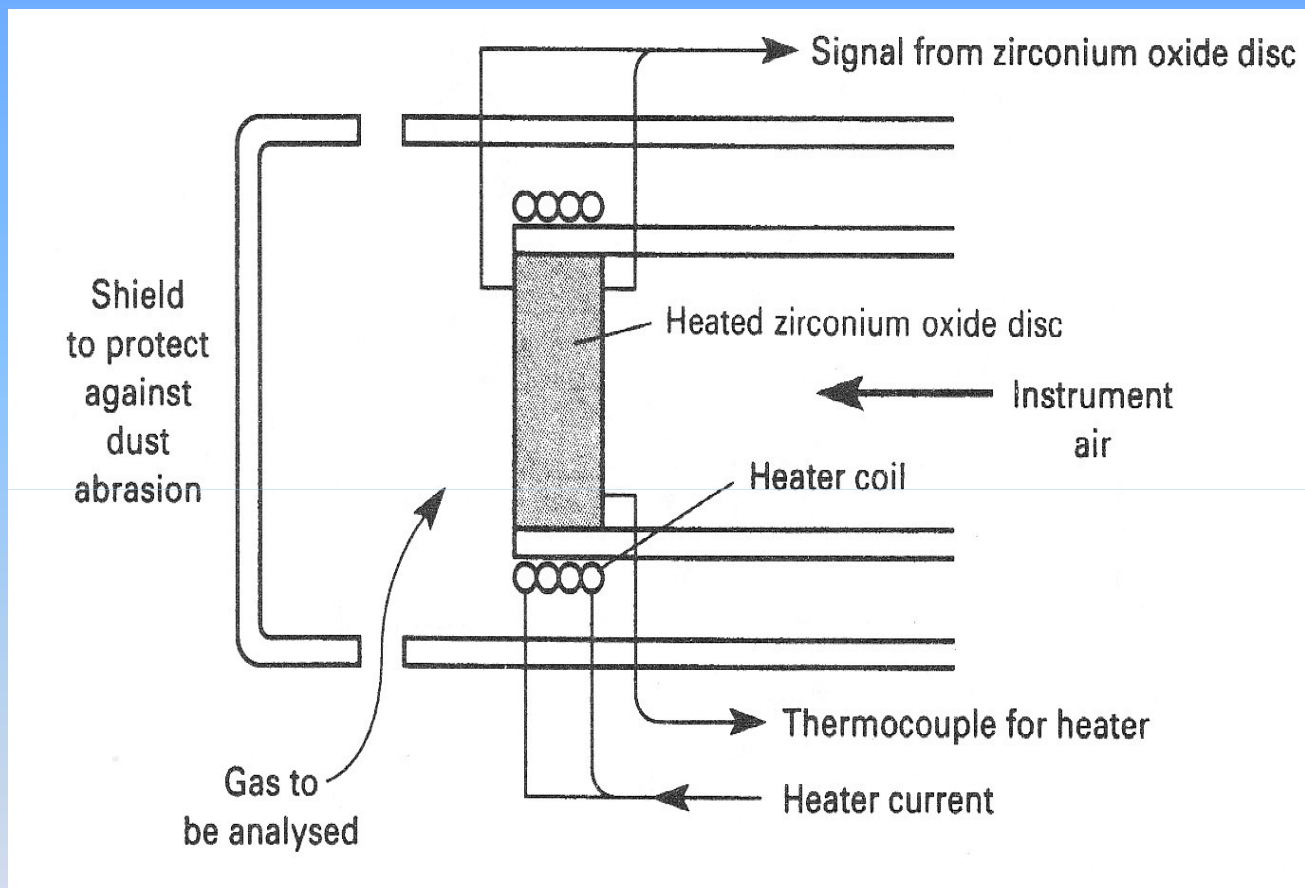


Slika 107. Temelj rada optičkog analizatora

Elektrometrička plinska analiza

- Ovakav tip analize koristi svojstva cirkonijeva oksida da mjeri sadržaj kisika u ispušnim plinovima procesa izgaranja
- Senzor se sastoji od diska napravljenog od cirkonijeva oksida te presvučenog poroznom platinom s obje strane
- Jedna strana diska je izložena ispušnim plinovima ili nekoj drugoj struji plinova, a druga strana najčešće običnim upravljačkim zrakom kao referentnim plinom
- Izvedba uređaja za analizu s cirkonij-oksidi diskom prikazana je na slici 108.
- Disk se zagrijava na 800°C pomoću grijača (temperatura diska se mjeri termoparom spojenim na disk), te se na toj temperaturi cirkonij-oksidi disk ponaša kao elektrolitički provodnik
- Na toj temperaturi stvara se napon između dva lica diska, te je izlazni napon oko 50mV (za sadržaj kisika koji je gotovo nula)
- Porastom udjela kisika u ispušnim plinovima izlazni napon opada

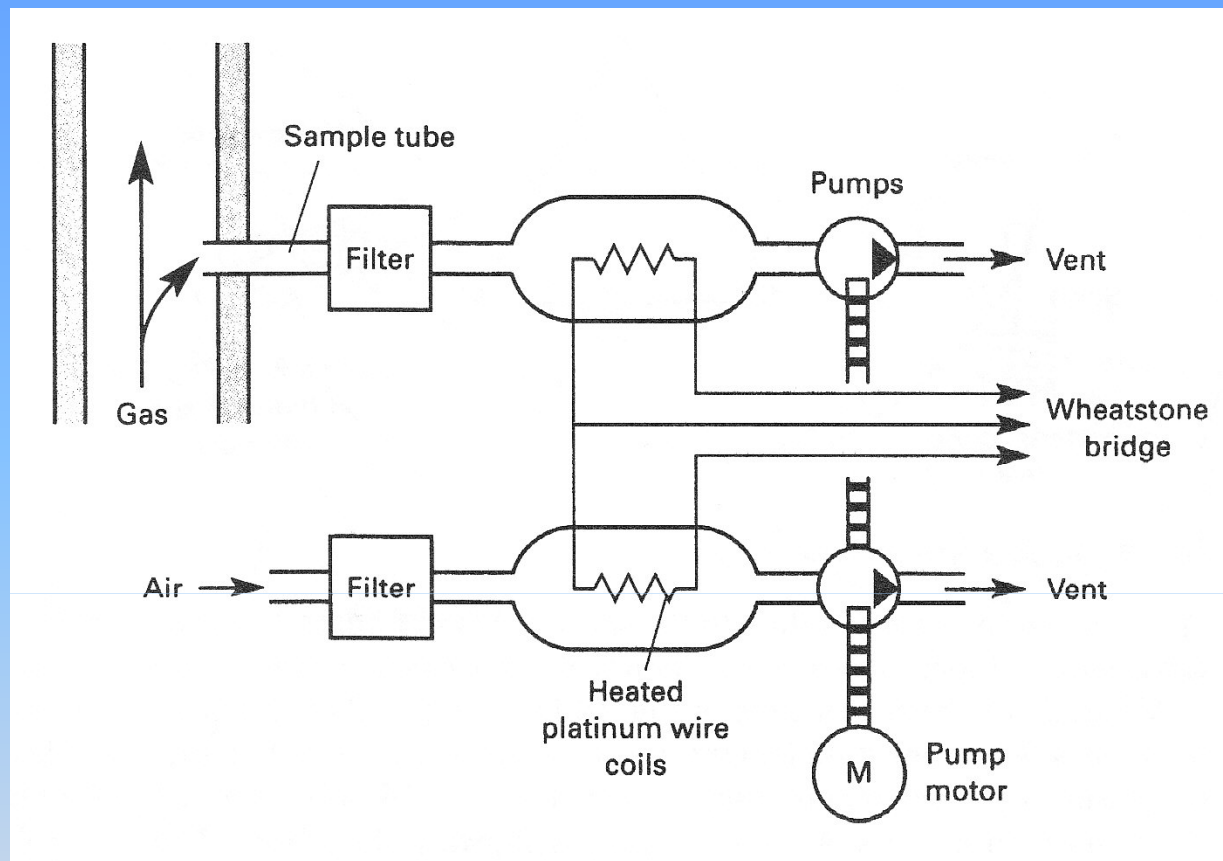
- Elektrometrički plinski analizator je vrlo ovisan o temperaturi zagrijavanja te ima ograničenu primjenu



Slika 108. Analizator s cirkonij – oksid diskom

Analiza metodom toplinske vodljivosti

- Ovom metodom najčešće se mjeri sadržaj ugljičnog dioksida u smjesi plinova
- Temelj rada prikazan je na slici 109. gdje se koriste dvije potpuno jednake komore
- Svaka komora sadrži jednaki grijač izrađen od žice od platine
- Otpor grijača mjeri se pomoću Wheatstonovog mosta
- Jednake količine ispušnih ili dimnih plinova i atmosferskog zraka dovode se u komore pomoću mjernih ventilatora (izraz pump se u ovom slučaju odnosi na ventilatore)
- Ugljični dioksid hladi grijače različitom brzinog nego što to radi kisik, dušik ili ugljični monoksid, odnosno obični atmosferski zrak
- Različita količina topline koja se odvodi s grijača poremeti će ravnotežu na Wheatstonovu mostu i što će rezultirati pojavom napona izravno ovisnog o koncentraciji ugljičnog dioksida



Slika 109. Analizator plina metodom toplinske vodljivosti