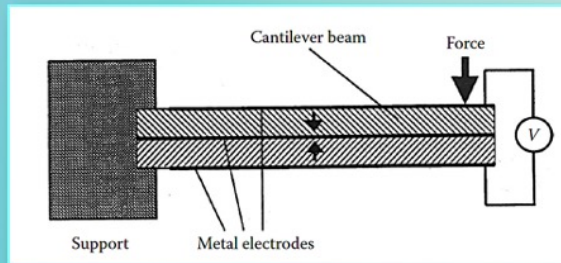


The background of the slide features a light blue gradient with a stylized circuit board pattern. The pattern consists of thin blue lines representing traces and small circles representing components, primarily concentrated on the left and right sides of the slide.

MJERENJE POMJERAJA, BRZINE I UBRZANJA

FIZIČKO-TEHNIČKA MJERENJA, ETR, ELEKTRONIKA

PIEZOELEKTRIČNI SENZORI POMJERAJA



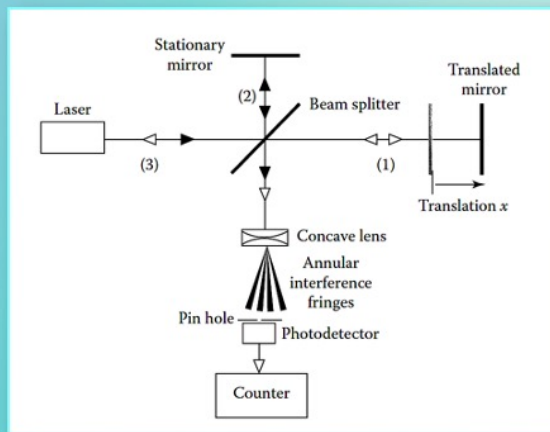
$$Q = \frac{3Hw}{8L} e_{31} \Delta l$$

Piezokeramika ima visok *Young*-ov modul elastičnosti što znači da je potrebna veća sila kako bi se generisalo naprezanje materijala koje se može izmjeriti. Uglavnom je senzor u formi duge trake ili tanke ploče postavljen kao konzola ili dijafragma. Pomjeraj kraja konzole dovešće do savijanja grede i mehaničkog naprezanja piezoelektričnog materijala. Kao posljedica, generisaće se električni napon. Primjer senzora za mjerenje pomjeraja na bazi piezoelektrika prikazan je na slici. Dvije grede su međusobno spojene u opoziciju sa jednom zajedničkom elektrodom između njih i po jednom spoljašnjom elektrodom. Savijanjem ovakvog sistema „prema dolje“ dolazi do istežanja gornje grede, i kompresije donje grede, što dovodi do generisanja naelektrisanja na elektrodama koje je proporcionalno pomjeraju Δl :

$$Q = \frac{3Hw}{8L} e_{31} \Delta l$$

pri čemu su H , w , i L debljina, širina i dužina konstrukcije, respektivno, dok je e_{31} transferzalni piezoelektrični koeficijent koji se odnosi na električnu polarizaciju i mehaničko naprezanje piezoelektričnog materijala.

LASERSKI MICHELSON-OV INTERFEROMETAR



$$L = z \frac{\lambda_v}{2}$$

Najtačnije mjerenje pomjeraja može se ostvariti upotrebom laserskog interferometra. Laserski interferometar bazira rad na poređenju optičke dužine puta svjetlosti sa talasnom dužinom svjetlosti.

Na slici je prikazana osnovna struktura *Michelson*-ovog interferometra. Koherentna monohromatska svjetlost He-Ne lasera pada na *beam splitter* koji dijeli svjetlost u dva snopa jednakog intenziteta (1) i (2). Snopovi svjetlosti se dalje odbijaju od stacionarnog i pokretnog ogledala čiji pomjeraj x se mjeri. Potom se svjetlost preko istog *splitter*-a, usmjerava prema konkavnom sočivu. Fazna razlika između snopova je određena razlikom njihovih optičkih dužina puteva. Ukoliko se ova razlika kontinualno mijenja sa pomjeranjem ogledala, mogu se pratiti sinusoidalne varijacije intenziteta svjetlosti iza sočiva.

Rezultantna svjetlost pada na fotodetektor radi daljeg procesiranja. U većini slučajeva, broj svjetlosnih maksimuma određuje brojač:

$$L = z \frac{\lambda_v}{2}$$

gdje je L pomjeraj, λ_v talasna dužina monohromatske svjetlosti u vakumu, dok je z broj svjetlosnih maksimuma. Kod preciznijih mjerenja, gdje je potrebno odrediti položaj pokretnog ogledala i između dva maksimuma, koristi se fotodetektor čija je izlazna struja kontinualna funkcija upadne svjetlosti.

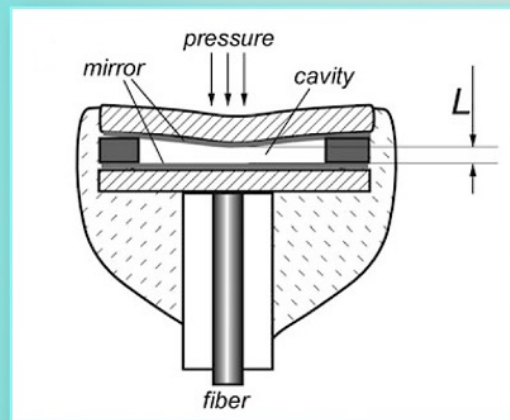
Prilikom pomjeranja pokretnog ogledala, pokret mora biti veoma pouzdan kako bi se izbjegle greške u brojanju interferentnih pruga. Za tu svrhu se koriste veoma kvalitetni linearni ležajevi kao što su vazdušni ležajevi.

Posmatrajući sliku, može se zaključiti da se dio reflektovane svjetlosti od ogledala vraća ka laseru. Na taj način dolazi do modulacije izlazne snage lasera, kao i talasne dužine svjetlosti koju laser emituje. Kako bi se izbjegla opisana pojava, komercijalni *Michelson*-ovi interferometri sadrže reflektore odgovarajućeg oblika umjesto ravnih ogledala.

<https://www.youtube.com/watch?v=UA1qG7Fjc2A>

<https://www.youtube.com/watch?v=j-u3IEgcTiQ>

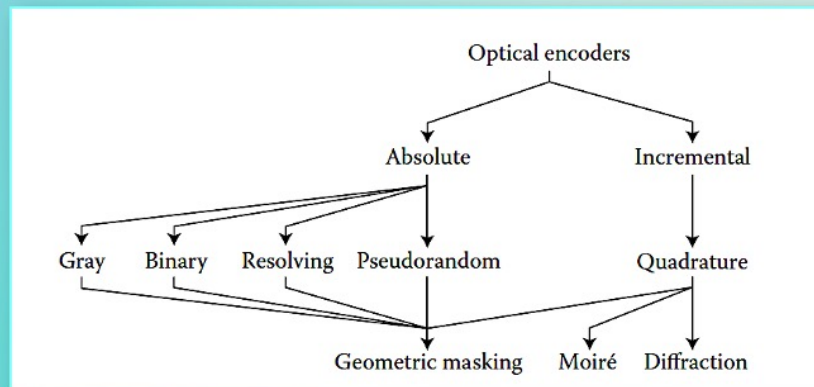
FABRY-PEROT SENZOR



Klasični *Michelson*-ov interferometar se koristi za mjerenje većih pomjeraja i rastojanja kada postoji dovoljno prostora za smještanje odgovarajućih optičkih komponenti. U situaciji kada je potrebna visoka tačnost, a nema dovoljno prostora, *Fabry-Perot* senzor može biti dobar izbor. Ovim uređajem može se mjeriti pomjeraj reda nanometara. Uređaj se sastoji od dva polu-reflektujuća ogledala okrenuta jedno ka drugome koja formiraju optičku šupljinu, i nalaze se na međusobnom rastojanju L , slika. Izvor svjetlosti može da bude laser. Fotoni unutar šupljine se odbijaju od ogledala naizmjenično, što dovodi do interferencije. Optička šupljina se ponaša kao neka vrsta „skladišta svjetlosti“ određene talasne dužine (učestanosti). Pri određenim frekvencijama fotona, svjetlost može napustiti šupljinu, što bi značilo da je *Fabry-Perot* senzor neka vrsta

optičkog filtra, čija transmisiona učestanost zavisi od rastojanja između ogledala L . Ukoliko je jedno od ogledala pokretno, mjerenjem optičke transmisionne frekvencije, mogu se detektovati vrlo male promjene rastojanja L , odnosno vrlo mali pomjeraji.

OPTIČKI ENKODERI KAO SENZORI POMJERAJA



Optički enkoderi se koriste za mjerenje ugaonog ili linearnog pomjeraja. Oni koji se koriste za mjerenje ugaonog pomjeraja često se označavaju kao rotacioni ili osovinski enkoderi. Optički enkoderi obuhvataju različite uređaje i svi koriste svjetlost kao posrednika u konverziji pokreta u električni signal. Sastoje se od dva osnovna elementa: glavne rešetke i sistema za detekciju. I linearni i rotacioni enkoderi mogu, u principu, biti apsolutni ili inkrementalni, iako se linearni apsolutni optički enkoderi veoma rijetko koriste zbog veoma loših performansi. Na slici je prikazan pojednostavljena klasifikacija optičkih enkodera. Klasifikacija ukazuje na prirodu dobijene informacije. Inkrementalni enkoderi detektuju pomjeraj u odnosu na referentnu tačku. Referentna tačka može biti i mehanička. Ukoliko dođe do gubitka napajanja ili do greške prilikom prenosa signala, apsolutna pozicija se gubi

i enkoder se mora vratiti na referentnu poziciju kako bi se resetovali brojači. Greška se može detektovati tek pri prolasku kroz referentnu tačku. Greške očitavanja se nagomilavaju. Sa druge strane, apsolutni enkoderi na izlazu daju apsolutnu poziciju, bez potrebe za poznavanjem istorije kretanja. Trenutna pozicija je poznata odmah po aktiviranju sistema.

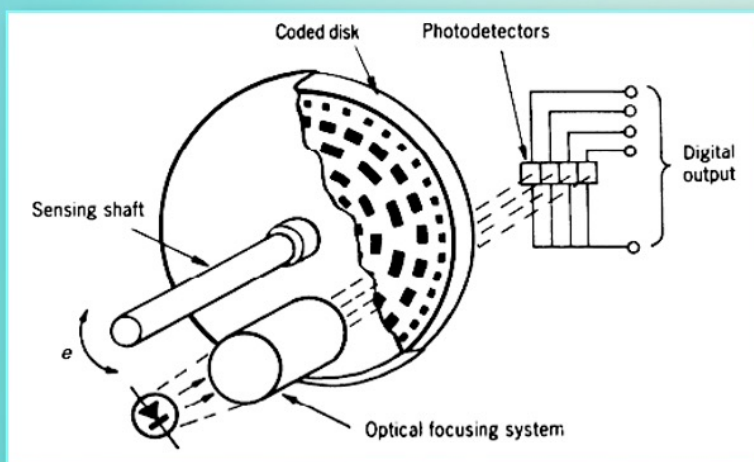
Većina inkrementalnih enkodera koristi kvadraturene signale kao izlaznu informaciju o kretanju. Kvadratureni signali postoje u analognoj i digitalnoj formi. Analogni kvadratureni signal se sastoji od sinusnog i kosinusnog talasnog oblika. Digitalni kvadratureni signal predstavljaju od dvije povorke pravougaonih impulsa međusobno pomjerene za 90° .

Inkrementalni enkoderi se dijele na osnovu optičke tehnike za generisanje kvadraturenih signala (geometrijske maske, na bazi difrakcije i *Moire fringes*).

Apsolutni enkoderi se klasifikuju na bazi koda koji koriste (*Gray*, binarni, otpički, pseudorandom), dok svi koriste geometrijske maske za generisanje koda.

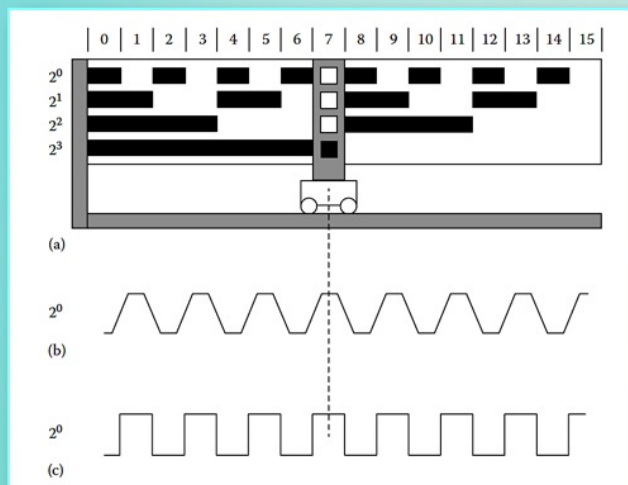
<https://www.youtube.com/watch?v=k2GQVJ4z0kM&t=14s>

APSOLUTNI POZICIONI OPTIČKI ENKODER



Apsolutni pozicioni enkoderi daju jedinstven digitalni izlaz za svaku poziciju pokretnog elementa, u odnosu na definisanu referencu. Pokretni element sadrži karakteristične regione koji odgovaraju logičkoj jedinici odnosno nuli. Za razliku od inkrementalnih enkodera, staze apsolutnih enkodera su uređene na način da sistem za čitanje daje kodirani broj koji odgovara svakoj pojedinačnoj poziciji. Svaka staza odgovara određenom izlaznom bitu, pri čemu je staza najbliža centru rezervisana za MSB.

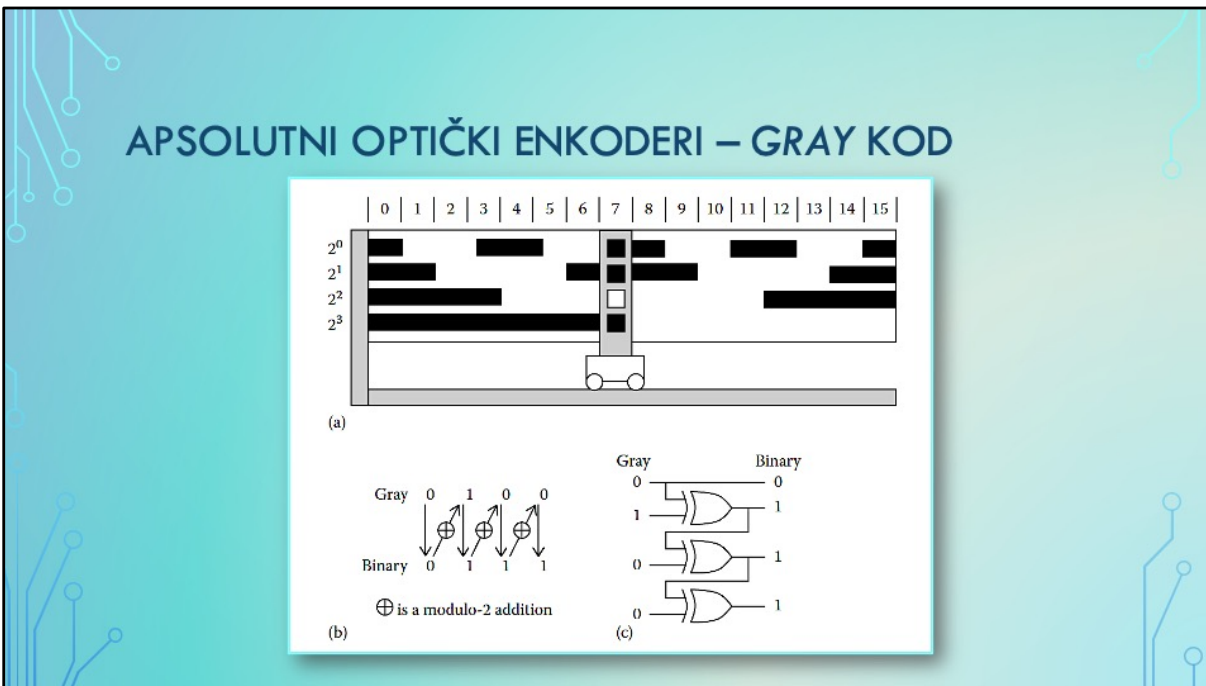
APSOLUTNI OPTIČKI ENKODERI – DIREKTNI BINARNI



Na slici je ilustrovan koncept apsolutnog linearnog optičkog enkodera koji koristi direktnu binarno kodiranu skalu. Fiksna skala ima n staza (ovdje je $n=4$), od kojih svaka obezbjeđuje jedan bit direktnog binarnog broja. Najniža staza (prva staza od centra diska kod rotacionih) je bit najveće težine 2^{n-1} (ovdje 2^3), dok najviša staza odgovara bitu najmanje težine 2^0 . Staza koja se odnosi na najmanje značajnu cifru ima 2^{n-1} ciklusa svijetlih i tamnih polja, dok staza koja se odnosi na bit najveće težine ima jedan takav ciklus. Za svaku traku, čitajuća glava ima izvor svjetlosti, masku i fotodetektor. Na slici (b) je prikazan izlaz fotodetektora za bit najmanje težine. Na slici (c) prikazan talasni oblik na izlazu enkodera za bit najmanje težine dobijen pomoću jednostavnog komparatora. Ukoliko se detektuje svjetlost, na izlazu je visoko stanje ili „1“, u suprotnom je na izlazu nisko

stanje ili „0“. Očitana pozicija je, dakle, $0111_{(2)} = 7_{(10)}$. Ovakav pristup nije pogodan za praktične primjene jer neke od tranzicija zahtijevaju promjene stanja nekoliko bita istovremeno. Na primjer, prilikom prelaska iz pozicije 7 u poziciju 8, svaki bit mijenja stanje. Ukoliko nije ostvarena savršena sinhronizacija, može doći do pogrešnog očitavanja. Bilo bi potrebno da skala bude geometrijski savršena, da čitajuće glave budu savršeno poravnate, i da prateća elektronika bude savršeno stabilna. Problem se rješava upotrebom *Gray*-ovog koda.

APSOLUTNI OPTIČKI ENKODERI – GRAY KOD



Kod *Gray* promjena između dva susjedna stanja se ogleda u promjeni samo jednog bita. Prednosti su sljedeće:

- Jednostavno se konvertuje u direktni binarni kod.
- Najfinija staza je dva puta šira od odgovarajuće staze u direktnom binarnom kodu.

Na slici (a) je prikazana linearna skala *Gray*-ovog koda, dok je na slici (b) prikazana šema za konverziju iz *Gray*-ovog koda u binarni kod:

- MSB oba koda su međusobno jednaki.
- XOR MSB binarnog broja i sljedećeg značajnog bita *Gray*-kodiranog broja.
- Ponavljati prethodni korak do kraja riječi.

Na slici (c) je prikazano jednostavno kolo na bazi kombinacione logike za konverziju *Gray*-ovog u binarni kod.

Pseudorandom kodiranje omogućava upotrebu samo dvije staze kod apsolutnog enkodera. Jedna staza služi za identifikaciju trenutne pozicije, dok druga staza omogućava sinhronizaciju. U pitanju je PSBS (*Pseudo Random Binary Sequence*). Ovakav kod se označava i kao *chain* kod i ima svojstvo da je prvih $(n-1)$ cifara n -bitne riječi jednako zadnjih $(n-1)$ cifara prethodne riječi.

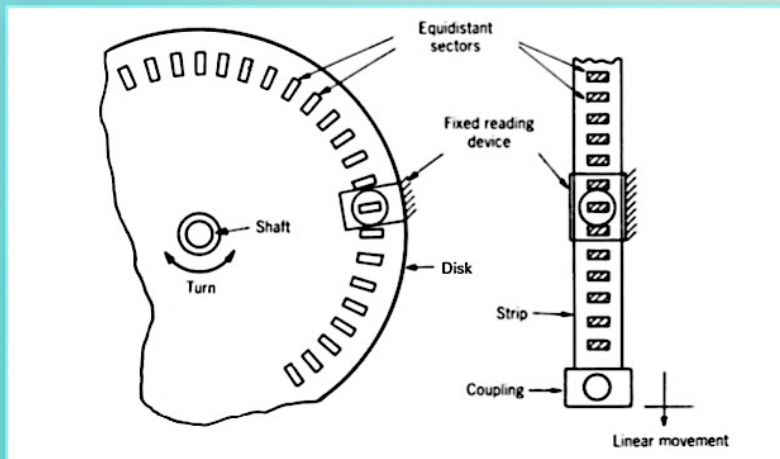
Kod **optičkog razrješavanja** koristi se samo jedna traka koja sadrži dugu jedinstvenu kombinaciju bita, slično bar kodu. Kamerom se snima trenutno vidljiv dio trake. Vršiti se upoređivanje i određivanje apsolutne pozicije sa rezolucijom od 1 nm, čak i pri brzinama od 100 m/s. Sistem je veoma imun na kontaminacije, jer je potrebno da samo četvrtina snimljenog koda bude tačna. Sistem se bazira na DSP-u.

APSOLUTNI POZICIONI ENKODER - PERFORMANSE

- Rezolucija od 6 do 21 bita u *Gray*-ovom kodu (najčešće od 8 do 12 bita)
- Prečnik od 50 mm do 175 mm za rotacione enkodere
- Tačnost do 20 "
- Primjena: praćenje sporog kretanja gdje pokretni element ostaje neaktivan dugo kao kod paraboličnih antena, pozicioniranje izvora zračenja kod radioterapije, kontrolu rada radara, orijentaciju teleskopa, kontrolu rada dizalica, regulaciju ventila...

Koriste se u mjernim i kontrolnim sistemima linearne i ugaone pozicije visoke rezolucije, kao što su: praćenje sporog kretanja gdje pokretni element ostaje neaktivan dugo kao kod paraboličnih antena, pozicioniranje izvora zračenja kod radioterapije, kontrolu rada radara, orijentaciju teleskopa, kontrolu rada dizalica, regulaciju ventila...

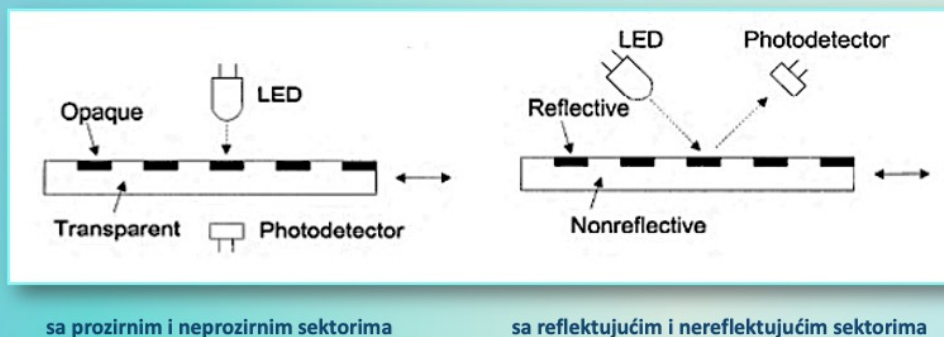
INKREMENTALNI POZICIONI OPTIČKI ENKODER



Inkrementalni pozicioni enkoder se sastoji od pokretnog dijela (ploče ili diska) i dijela koji ga pokreće a čiju poziciju treba odrediti. Disk (ploča) je podijeljen na segmente jednake širine koji se ponavljaju. Očitavajući broj promjena dobija se informacija o poziciji. Metod je veoma jednostavan i ekonomičan, međutim ima svoje nedostatke. Prilikom prestanka napajanja iz bilo kog razloga, informacija o poziciji se gubi. Takođe, neophodan je brojač na izlazu. Osim toga, informacija o smjeru kretanja se ne može dobiti na osnovu strukture prikazane na slici.

Na izlazu je povorka pravougaonih impulsa sa 50 % *duty cycle*-om.

INKREMENTALNI POZICIONI OPTIČKI ENKODER

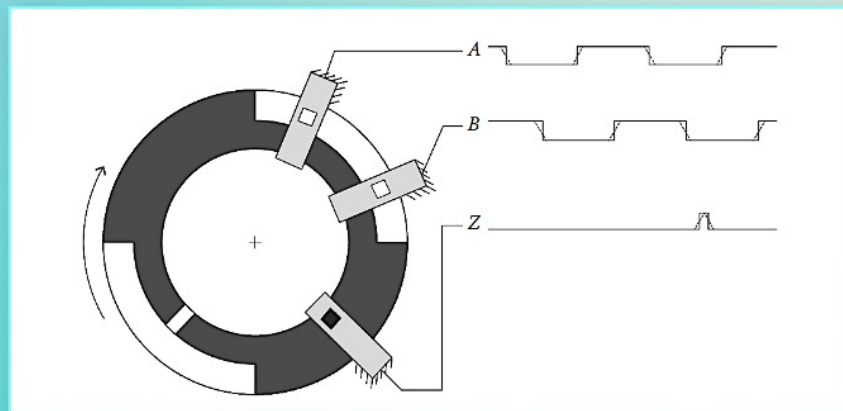


Optički enkoderi se mogu bazirati na neprozirnim i transparentnim regionima, na reflektujućim i nereflektujućim regionima. Fiksna čitajuća glava sadrži izvor svjetlosti i fotodetektor. Glavni problemi se javljaju zbog čestica prašine, vremenskog i temperaturnog *drift*-a koji se odnosi na optoelektronske komponente, kao i zbog efekata vibracija u dijelu za fokusiranje. Kvalitetni senzori posjeduju sočiva koja obezbjeđuju kolimitirani svjetlosni izlaz, i minimalnu lažnu refleksiju.

Kada se koriste prozirni i neprozirni sektori (hrom na staklu, metal sa prorezima), izvor svjetlosti i prijemnik moraju biti sa suprotnih strana elementa koji se pomjera (slika lijevo). U drugom slučaju (slika desno), kada su u pitanju reflektujuć i nereflektujuć sektori (npr. ispolirani čelik sa ugraviranim

segmentima), izvor svjetlosti i prijemnik moraju biti sa iste strane elementa koji se pokreće. Diskovi od stakla su stabilniji, krući i glatkije površine u odnosu na metalne diskove, ali su manje otporni na vibracije i šokove.

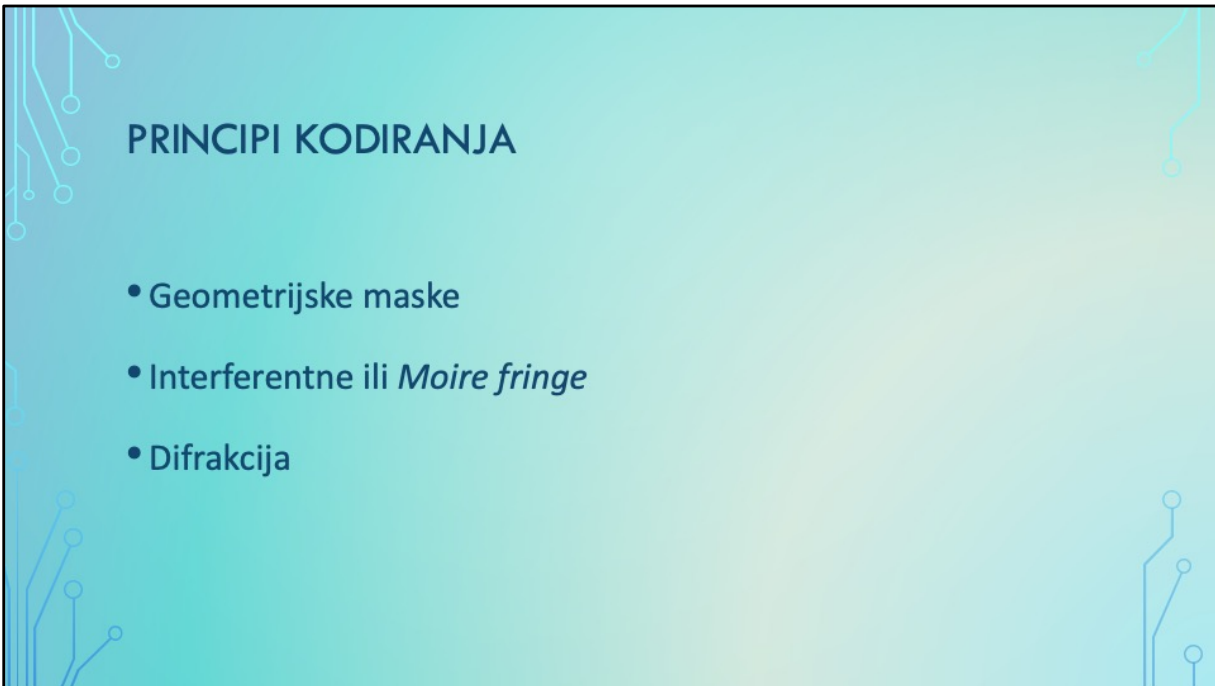
INKREMENTALNI OPTIČKI ENKODERI – DIGITALNI KVADRATURNI SIGNALI



Na slici je prikazan koncept inkrementalnog rotirajućeg optičkog enkodera. Na disku koji rotira nalazi se jednak broj naizmjenično postavljenih svijetlih i tamnih sektora jednake dužine. Detekcija se vrši pomoću stacionarne maske sa dva otvora, A i B, međusobno udaljena za četvrtinu ciklusa. Rezultujući signali A i B su kvadratnog talasnog oblika fazno pomjereni za 90° i označavaju se kao kvadraturni signali. Kvadraturni signali se koriste za inkrementiranje ili dekrementiranje stanja brojača. Brojač se inicijalizuje (resetuje) na osnovu z signala (slika), koji se nalazi na posebnoj stazi. Ukoliko signal A prednjači, u pitanju je jedan smjer rotacije, ukoliko signal B prednjači u pitanju je drugi smjer rotacije. Na osnovu utvrđenog smjera rotacije, vrši se inkrementiranje ili dekrementiranje stanja brojača.

Kod nekih optičkih enkodera na izlazu su analogni kvadrturni signali ($\sin\theta$ i $\cos\theta$). θ nije jednak uglu rotacije, već 360° faze kvadrturnog signala odgovara $360/N$ mehaničkih stepeni, gdje je N broj ciklusa izlaznog kvadrturnog signala po ciklusu mehaničke rotacije.

<https://www.youtube.com/watch?v=-Qk--Sjgq78>

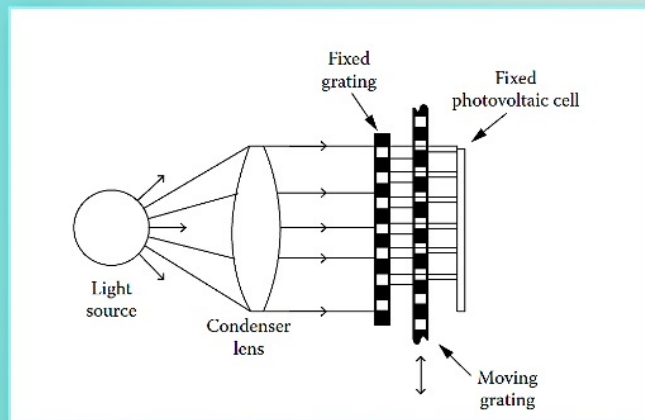


Optički enkodori koriste jednu od tri osnovne tehnike prilikom generisanja električnih signala na osnovu relativnog kretanja optičke rešetke i čitajućih glava. To su:

- Geometrijske maske
- *Moire* efekat
- Difrakcija

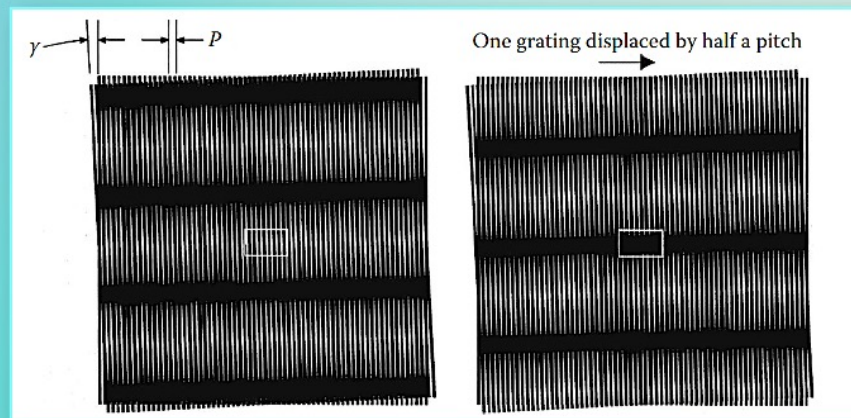
Apsolutni enkodori uglavnom koriste geometrijske maske. Međutim, kako se povećava rezolucija enkodera, dolazi do izražaja *Moire* efekat koji se može iskoristiti za generisanje signala. Konačno, za veoma visoku rezoluciju direktno se koriste efekti difrakcije.

PRINCIPI KODIRANJA – GEOMETRIJSKE MASKE



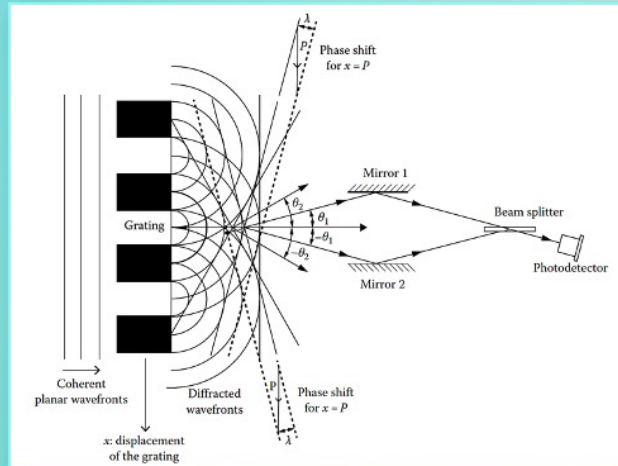
Geometrijske maske se koriste i kod apsolutnih i kod inkrementalnih enkodera. U ovom slučaju, zanemaruje se difrakcija i može se smatrati da se svjetlost prostire pravolinijski. Ova aproksimacija je validna ukoliko je širina optičkog procjepa veća od desetak mikrona. Na slici je prikazan dio skale enkodera koji skenira čitajuća glava sa više proreza kako bi se što više svjetlosti usmjerilo ka foto-osjetljivoj oblasti. Izvor svjetlosti se usmjerava (kolimatizuje), prolazi kroz fiksnu optičku rešetku (indeksnu rešetku) i dalje kroz pokretnu rešetku. U zavisnosti od međusobnog položaja pokretne i indeksne rešetke, više ili manje svjetlosti će se usmjeriti ka fotodetektoru.

PRINCIPI KODIRANJA – MOIRE FRINGES



Moire fringes se mogu uočiti kada svjetlost prolazi kroz dva slična periodična šablona na veoma malom međusobnom rastojanju, čiji pravci su približno paralelni, slika. Jedna rešetka je fiksna, dok je druga pokretna. Horizontalna tamna pruga se pomjera po vertikalnoj osi u zavisnosti od nagiba pokretne rešetke u odnosu na fiksnu. Malom pomjeraju odgovara značajno pomjeranje tamne pruge, što znači da se ovaj pristup može koristiti kao „pojačavač“ pomjeraja, odnosno, za mjerenje veoma malih pomjeraja. Položaj pruga „prati“ fotodetektor inkrementalnog enkodera. Postoje posebno razvijeni algoritmi na osnovu kojih se određuje pomjeraj kao funkcija položaja *Moire* pruga.

PRINCIPI KODIRANJA – DIFRAKSIONI ENKODERI



Najveći stepen tačnosti imaju enkoderi bazirani na difrakciji koji se označavaju i kao fizičko-optički enkoderi za razliku od geometrijskih optičkih enkodera koji su prethodno opisani. Na slici je prikazan princip rada difrakcionih enkodera. Optički otvor je širine nekoliko talasnih dužina svjetlosti, što dovodi do izražene difrakcije. Svaki otvor se zapravo može smatrati koherentim izvorom svjetlosti. Pomjeranjem optičke rešetke dolazi do formiranja interferentnih pruga što “prati” fotodetektor.

INKREMENTALNI ENKODERI – PERFORMANSE I PRIMJENA

Ugaoni inkrementalni enkoderi

- Rezolucija: od 100 impulsa/obrtaju do 81000 impulsa/obrtaju
- tačnost do 30''
- prečnik diska obično od 25 mm do 90 mm

Linearni inkrementalni enkoderi

- rezolucija do 0.5 μ m/periodi
- tačnost do 50 μ m

Primjena: pozicioniranje papira u štampačima, kopir aparatima, pozicioniranje alata u automatizovanim mašinama, pozicioniranje upisno-čitajuće glave magnetnog diska, kao zamjena za kontrolne potencioetre na instrument tablama

Inkrementalni enkoderi se koriste za kontrolu pozicije: pozicioniranje papira u štampačima, kopir aparatima, pozicioniranje alata u automatizovanim mašinama, pozicioniranje upisno-čitajuće glave magnetnog diska, kao zamjena za kontrolne potencioetre na instrument tablama...

POREĐENJE APSOLUTNOG I INKREMENTALNOG POZICIONOG ENKODERA

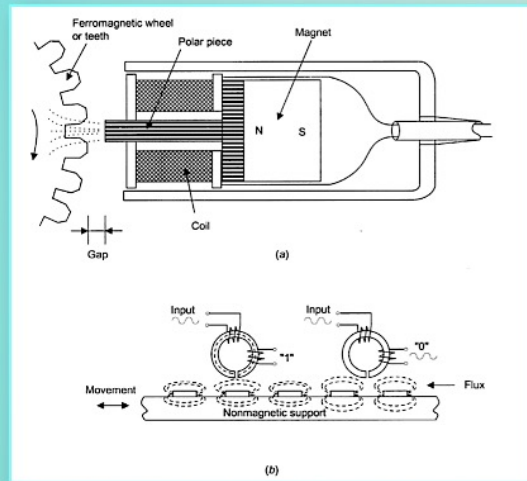
Apsolutni enkoderi

- Imunost na prekide napajanja
- Ne akumuliraju greške
- Složenija konstrukcija čitača
 - potrebno je onoliko čitajućih glava koliko ima bita
 - potrebno je da čitajuće glave budu savršeno poravnate

Inkrementalni enkoderi

- Nisu imuni na prekide napajanja
- Akumuliraju greške
- Principijelno jednostavnije konstrukcije
- Jednostavni za upotrebu
- Niža cijena

MAGNETNI INKREMENTALNI POZICIONI ENKODER



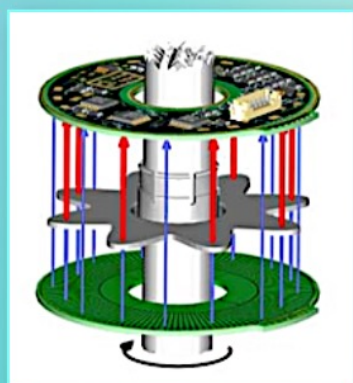
Slika a): Svaki put kada zupčanik od feromagnetnog materijala prođe pored fiksne zavojnice u stalnom magnetnom polju, mijenja se indukovani napon. Rezultujući napon je periodičan, i kao takav jednostavan za prevođenje u kvadratni talasni oblik. Postoje ograničenja u smislu opsega brzina. Ovaj pristup se, na primjer, koristi u *antilock breaking* sistemima (ABS) kod automobila.

Slika b): Sistem torusnim jezgrom sa dva namotaja. Jedan namotaj služi kao pobuda, sa frekvencijom 20 kHz do 200 kHz, dok drugi služi za detekciju. Postoje dva izlazna stanja: "1" kada se ne detektuje napon i "0" kada se detektuje napon iste frekvencije kao i pobuda. Element koji se pomjera sadrži segmente od namagnetisanih materijala. Svaki put kada jedan

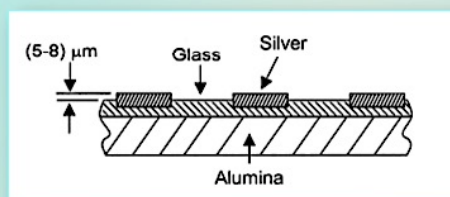
takav segment "prođe" pored čitajuće glave, jezgro se zasiti jer se generisani fluks sabira sa fluksom pobude. Kada dođe do zasićenja jezgra, sekundarni namotaj ne detektuje promjenu napona, stanje "1". U slučaju kada pored čitajuće glave prolazi segment koji nije namagnetisan, sekundarni namotaj detektuje napon koji indukuje primarni namotaj, stanje "0".

Induktivni senzori su osjetljivi na strana magnetna polja.

ELEKTRIČNI INKREMENTALNI POZICIONI ENKODER



kapacitivni inkrementalni pozicioni enkoder,
Netzer Precision Motion Sensors Ltd.



kontaktni inkrementalni pozicioni enkoder

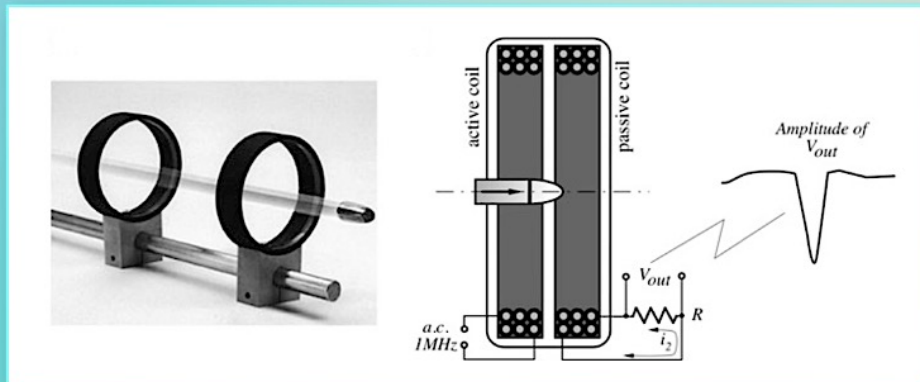
Električni enkoderi mogu biti kapacitivni i kontaktni.

Kapacitivni enkoderi su novijeg datuma. Odlikuje ih visoka preciznost koja ne odlikuje magnetne enkodere i robusnost koja ne odlikuje optičke enkodere. Osim toga, potrošnja im je veoma mala u odnosu na ostale tipove enkodera. Nedostatak je osjetljivost na šum i električnu interferenciju. Kapacitivni enkoderi detektuju promjenu kapacitivnosti upotrebom visokofrekventnog referentnog signala. Sastoje se iz tri dijela: transmitera, rotora i prijemnika. Kako se rotor okreće, visokofrekventni signal koji daje transmieter se moduliše i kao takav se prosljeđuje prema prijemniku. Na strani prijemnika se vrši prevođenje primljenog signala u inkremente rotacionog kretanja. Rezolucija izlaznog signala je i do nekoliko hiljada

impulsa po obrtaju.

Kontaktни enkoder prikazan na slici desno sadrži pokretni dio (aluminijumsku podlogu), sa slojem od stakla i provodnom paladium-srebro štampom na površini. U toku proizvodnog procesa, jedinjenje srebra uranja se u staklo, slika. Klizač je od plemenitog metala. Tehnologiju "srebro u staklu" odlikuje niska cijena, visoka otpornost na koroziju, i očekivani vijek od 15 miliona ciklusa. Kod kontaktnih enkodera treba uzeti u obzir i *bouncing* prilikom tranzicije.

MJERENJE SREDNJE LINIJSKE BRZINE

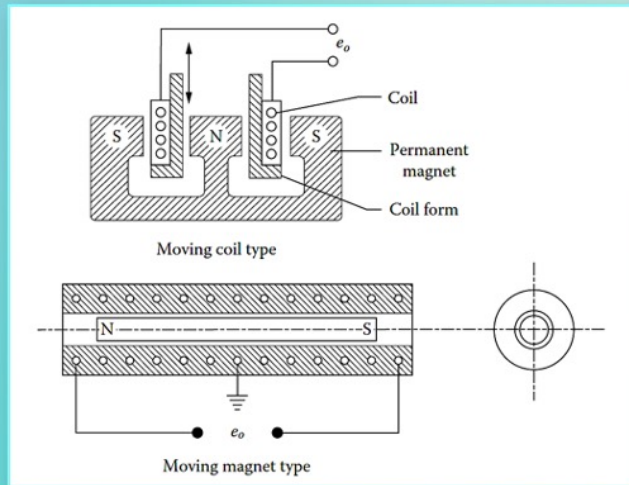


Srednja brzina u određenom pravcu se može odrediti na osnovu izmjerenog rastojanja u istom pravcu pređenog za određeno vrijeme. Slijedi da se određivanje brzine može svesti na mjerenje rastojanja i vremena. Postavljanjem dva detektora prisustva, sa dovoljno brzim odzivom, na poznatom međusobnom rastojanju Δx i mjerenjem vremena između dvije detekcije se može odrediti srednja brzina. Odabir detektora prisustva zavisi od nekoliko faktora kao što su očekivana brzina kretanja objekta, zahtijevana tačnost, materijal pokretnog objekta, njegova veličina itd.

Primjer bi mogao biti mjerenje brzine metka kako je prikazano na slici. Poznato je da se metak kreće veoma velikom brzinom, reda km/s. Takođe je poznato da je metak napravljen od nekog

provodnog materijala, da mu je prečnik reda 10 mm, a dužina reda 20 mm. Slijedi da je za određivanje brzine metka pogodan sistem baziran na video kamerama visoke brzine, ili neki magnetni senzor. U ilustrovanom primjeru (slika), oba dupla prstena sadrže dva namotaja od kojih je jedan aktivni, napajan naizmjeničnom strujom frekvencije 1 MHz, što je dovoljno za pouzdano mjerenje brzine metka. Drugi namotaj je pasivni magnetno spregnut sa prvim, i u njemu se indukuje struja i_2 . Kada metak prođe kroz prvi prsten u metku se indukuju viorne struje koje formiraju magnetno polje koje se suprotstavlja originalnom polju. Kao rezultat, amplituda struje u drugom kalemu opada. Isto se dešava i kada metak prođe kroz drugi prsten. Vrijeme koje protekne između dva generisan impulsa, preciznije između dva minimuma indukovanih struja (što odgovara trenutku kada metak prolazi kroz centar prstena) određuje brzinu metka, jer je rastojanje između prstenova poznato i konstantno.

MJERENJE LINIJSKE BRZINE



$$e_i = Blv$$

Jedan od tipova pretvarača brzine baziran na *Farady*-evom zakonu elektromagnetne indukcije prikazan je na slici. Kalem je stacionaran, dok je jezgro od stalnog magneta pokretno i povezano za objekat čija se brzina mjeri. Prilikom kretanja jezgra, dolazi do indukovanja napona u kalem, prema relaciji:

$$e_i = Blv$$

pri čemu je B magnetna indukcija, l dužina žice kalema, dok je v brzina kretanja jezgra u odnosu na kalem. Dakle, napon na krajevima je proporcionalan brzini koja se mjeri.

Upravo na ovoj relaciji se baziraju linearni pretvarači brzine LVT (*Linear Velocity Transducer*).

Stacionarni senzori brzine određuju brzinu duž rastojanja koje je ograničeno dimenzijama sistema, pa se u većini slučajeva koriste

za određivanje brzine vibracija.

MJERENJE LINIJSKE BRZINE - RADARI

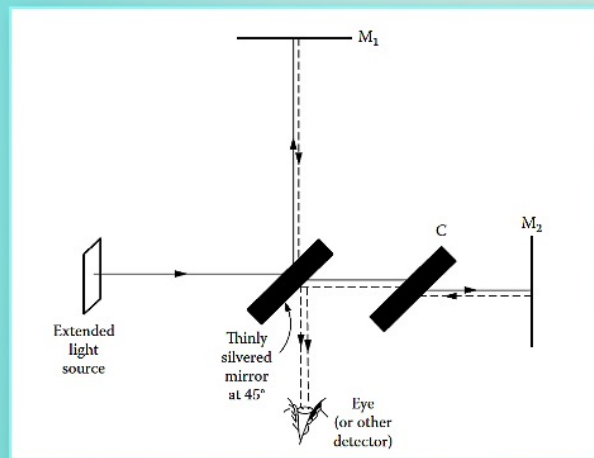
- Radari:
 - Impulsni radari
 - Kontinualni radari (*Doppler radari*)

Doppler-ove efekat se sastoji u promjeni frekvencije talasa kada postoji relativno kretanje između izvora talasa i posmatrača. Učestanost će se povećavati kada se rastojanje između izvora i posmatrača smanjuje, i obratno.

Radar je još jedna tehnika detektovanja pozicije, kretanja i prirode udaljenog objekta na osnovu radio talasa reflektovanih sa površine objekta. Impulsni radar koristi jednu usmjerenu antenu za emitovanje i prijem talasa. Obično emituje mikrotalase u impulsima, od kojih će se dio reflektovati sa površine posmatranog objekta. Reflektovani talas prihvata radar, a potom se signal obrađuje i prikazuje u pogodnom obliku. Antena mora biti povezana samo za odašiljač kada šalje signal, odnosno, samo za prijemnik kada prima signal. Prethodno se

ostvaruje prekidačkim tehnikama koje u dijelu mikrosekunde izvrše potrebno prebacivanje. Rastojanje između objekta i radara se određuje mjerenjem vremena koje je potrebno da radarski signal „dođe do mete i vrati se“. Impulsni radari se prije svega koriste u vojnim primjenama i vazdušnom saobraćaju. Kada je u pitanju *Doppler* radar, koriste se dvije antene. Jedna da šalje kontinualan signal, a druga da prihvata signal. Kako vrijeme između slanja i prihvatanja kontinualnog talasa nije moguće izmjeriti, ovaj tip radara se ne može koristiti za mjerenje rastojanja. Brzina kretanja se može odrediti na osnovu promjene frekvencije. Radarom se može mjeriti brzina rotacije vjetra u toku oluje i eventualno predvidjeti tornado.

MJERENJE LINIJSKE BRZINE NA BAZI INTERFERENCIJE SVJETLOSTI



Mjerenje brzine se može izvršiti upotrebom principa interferencije svjetlosti. Svjetlosni snop monohromatske svjetlosti se dijeli na dva snopa. Jedan od ta dva snopa se usmjerava prema statičnom ogledalu. Drugi snop se usmjerava prema pokretnom ogledalu. Posmatrač vidi superpoziciju ova dva snopa. Kako se pokretno ogledalo kreće u jednom smjeru, suma talasa će se periodično mijenjati. Pomjeraj koji odgovara jednom ciklusu svijetlo-tamnih pruga određen je talasnom dužinom svjetlosti. Frekvencija nastalih svijetlo-tamnih tranzicija je proporcionalna brzini pokretnog ogledala. Interferometarskim metodama se postiže veoma visoka tačnost.

Novija metoda za određivanje zavisnosti brzine od vremena jeste *VISAR (Velocity Interference System for any Reflector)*. Kod

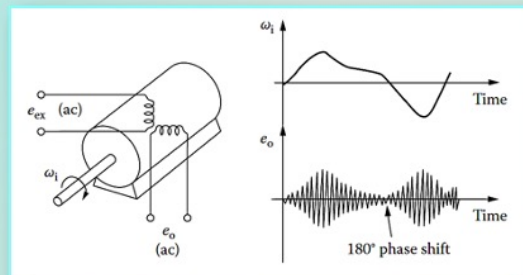
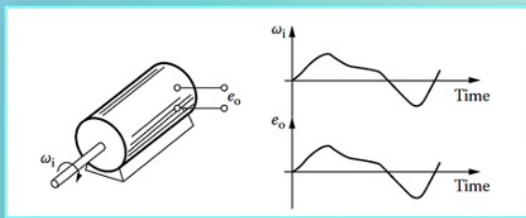
prethodnih interferometarskih metoda bilo je neophodno da je površina pokretnog objekta savršeno glatka i da je nagib što manji u toku testiranja. Kod VISAR sistema, mjerenje se može obaviti bez obzira na prethodne uslove. Ova metoda se može koristiti za mjerenje veoma velikih vrijednosti brzina.

MJERENJE UGAONE BRZINE

- Relativni senzori ugaone brzine
 - Električni (DC i AC) tahogeneratori
 - Reluktantni
 - Optoelektronski
 - Na bazi *Hall*-ovog efekta
- Apsolutni senzori ugaone brzine
 - Žiroskopi

Mjerenje ugaone brzine se često koristi kada su u pitanju rotacione mašine kao što su generatori, motori, pumpe, itd. Najčešće korišćena mjerna jedinica je [rpm] (*revolutions per minute*). U najvećem broju slučajeva, mjerenje broja obrtaja uključuje generaciju povorke pravougaonih impulsa ili sinusnog talasnog oblika čija frekvencija je proporcionalna ugaonoj brzini. Mjerna tehnologija podrazumijeva upotrebu AC i DC tahogeneratorskih senzora, optičkih senzora, senzora sa varijabilnom reluktansom, rotirajućih magnetnih senzora, stroboskopa...

MJERENJE UGAONE BRZINE ELEKTRIČNI (DC I AC) TAHOGENERATORI



Osnovna primjena tahogeneratora je stabilizacija rada servo-mehanizama. Međutim, kako im je izlazni napon linearno srazmjeran ugaonoj brzini, koriste se i za mjerenje ugaone brzine. Imaju minijaturne dimenzije, tako da predstavljaju malo mehaničko opterećenje za ispitivani objekat i omogućavaju dinamička mjerenja sa velikim ugaonim ubrzanjima.

DC generator generiše DC napon koji je proporcionalan brzini, slika lijevo. Generator se sastoji od stalnog magneta u čijem se polju obrće rotor sa kolektorom. Izlazni napon se odvodi pomoću četkica, čije habanje može da predstavlja jedan od glavnih nedostataka ovog pretvarača. Opseg jednosmjernih tahogeneratora iznosi 5000 obrtaja po minuti, dok je tipična osjetljivost 1-2 V po 100 ob/min.

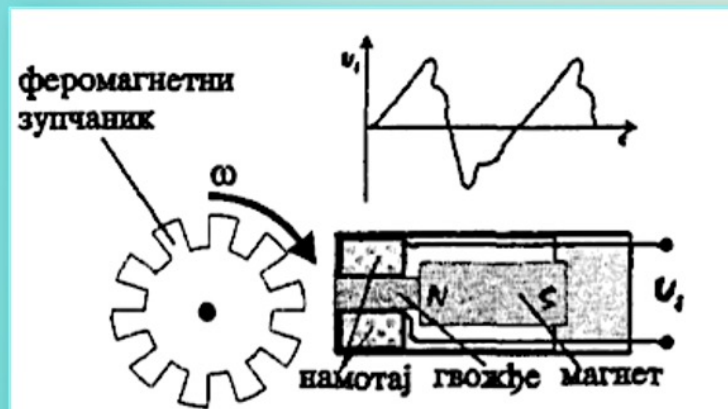
Naizmjenični tahogenerator se sastoji od rotora i dva stacionarna namotaja, slika desno. Na jedan namotaj se dovodi pobudni naizmjenični napon e_{ex} stalne amplitude i učestanosti 50 Hz ili 400 Hz. Pri obrtanju rotora na izlaznom namotaju se generiše napon e_o iste učestanosti kao napon e_{ex} i amplitude proporcionalne ugaonoj brzini rotora tj. izlazni napon je amplitudski modulisan. Pri jednom smjeru obrtanja izlazni signal je u fazi sa naponom e_{ex} , pri promjeni smjera obrtanja dolazi do promjene faze za π . Promjena smjera ugaone brzine se može registrovati ako se izlazni napon demoduliše fazno osjetljivim detektorom.

Mjerni opseg naizmjeničnih tahogeneratorsa se kreće do 3600 ob/min, dok je osjetljivost niža nego kod jednosmjernih generatora i iznosi oko 0.3 V po 100 ob/min. Brzina promjene ugaone brzine mora biti relativno niska (5 - 10 puta) u poređenju sa učestanošću pobudnog napona.

Tahometri se nalaze u svakom automobilu za mjerenje broja obrtaja motora.

Postoji čitava klasa mjernih tehnika koje se koriste za mjerenje ugaone brzine koje se baziraju na "brojanju impulsa" nastalih kao rezultat elektro-mehaničke reakcije. Na izlazu se koristi konvertor impulsa u napon proporcionalan ugaonoj brzini.

MJERENJE UGAONE BRZINE RELUKTANTNI SENZORI

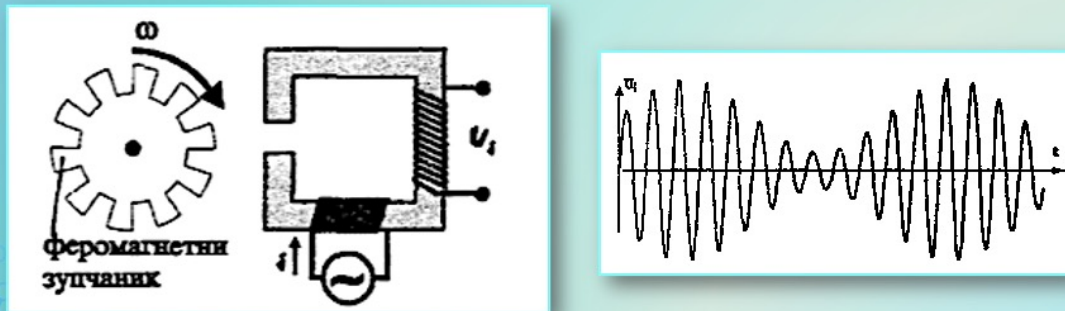


Sastoje se od jednog ili dva spregnuta namotaja u vidu transformatora. Reluktantni pretvarači raspolažu magnetskim kolom čija se reluktansa mijenja usljed obrtanja posmatranog objekta. Induktivni pretvarači su slične konstrukcije ali nemaju jezgro od feromagnetskog materijala. Objekat (osovina) čija se ugaona brzina mjeri treba da ima jedan ili više metalnih zubaca raspoređenih po obodu. Senzor se postavlja u blizini osovine, tako da pri obrtanju zupci svojim prolaskom mijenjaju reluktansu, odnosno induktivnost kalema.

Na slici je prikazan reluktantni senzor. Magnetsko kolo se sastoji od stalnog magneta i nastavka od mekog gvožđa. Prolaskom feromagnetskog zupca mijenja se reluktansa (kad je zub bliže reluktansa se smanjuje, fluks se povećava), usljed čega se u

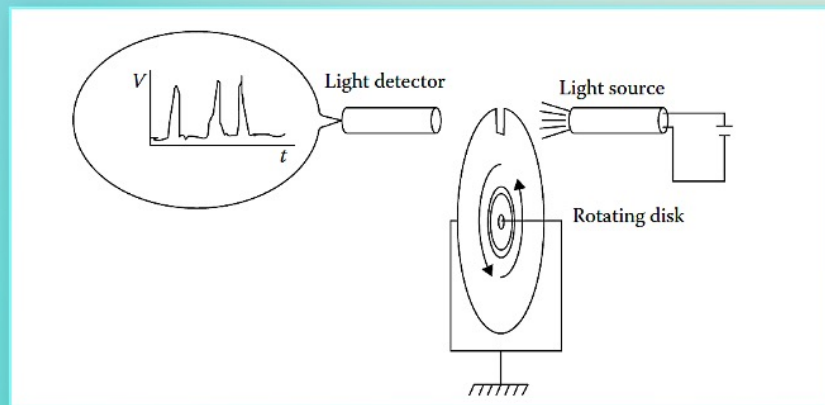
kalemu mijenja fluks, a time i dobija indukovani izlazni napon. Ako osovina ima na sebi N zubaca, frekvencija izlaznog napona je Nf_0 , gdje je f_0 broj obrtaja osovine u sekundi. Napon na izlazu je naizmjeničan, nepravilnog oblika. Karakteristično je da su i amplituda i frekvencija izlaznog napona proporcionalni ugaonoj brzini osovine. Osnovni nedostatak reluktantnih pretvarača sa stalnim magnetom je ograničenost primjene u opsegu malih ugaonih brzina. Naime, pri sporom obrtanju, amplituda impulsa je vrlo mala, tako da šumovi i indukovane smetnje zasjenjuju korisni signal. U opsegu visokih brzina do 15000 obrtaja u minuti, ovi senzori imaju dobre osobine. Između objekta i senzora postoji privlačna sila što može biti problem kada je snaga na osovini mala.

MJERENJE UGAONE BRZINE RELUKTANTNI SENZORI



Na slici je prikazan reluktantni pretvarač oblika transformatora. Primar se napaja iz naizmjeničnog izvora frekvencije nekoliko kiloherca. Sekundarni napon u_s , prolaskom svakog zupca, mijenja amplitudu jer se mijenja koeficijent sprege primar-sekundar. Izlazni napon u_s je amplitudski modulisan, pa ga je potrebno demodulisati i konvertovati u povorku pravougaonih impulsa. Osnovna prednost ovog kola je gotovo konstantna osjetljivost za praktično sve radne učestanosti počevši od nule. U principu, mjerenje je ograničeno u opsegu visokih učestanosti. Izborom dovoljno velike učestanosti napajanja, pretvarač se može primijeniti i pri vrlo velikim ugaonim brzinama.

MJERENJE UGAONE BRZINE OTPOELEKTRONSKI SENZORI



Glavna prednost optoelektronskih senzora za mjerenje ugaone brzine u odnosu na elektrodinamičke je u tome što daju izlazni signal čija amplituda ne zavisi od ugaone brzine i što ne opterećuju osovinu.

Optičke metode mjerenja ugaone brzine koriste izvor svjetlosti i detektor svjetlosti.

Princip je ilustrovan slikom. Disk sa prorezom (prorezima) postavljen je na rotirajuću osovinu. Svaki prorez će omogućiti svjetlosti da prođe prema detektoru. Detektor će generisati povorku impulsa čija učestanost je proporcionalna ugaonoj brzini. Kod optičkih metoda se mora uzeti u obzir uticaj ambijentalne svjetlosti.

MJERENJE UGAONE BRZINE OTPOELEKTRONSKI SENZORI



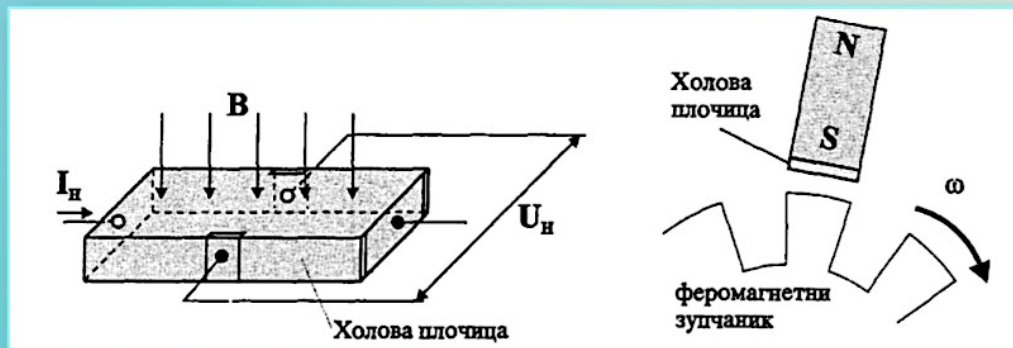
Kod senzora sa slike, osovina je podijeljena na dva segmenta. Površina jednog segmenta reflektuje, a drugog apsorbuje svjetlost. Svjetlosni izvor i fotodetektor su postavljeni tako da u jednom položaju reflektovana svjetlost aktivira fotodetektor, dok u drugom položaju fotodetektor ne daje izlazni signal. Na taj način se dobija jedan impuls pri svakom obrtaju osovine. Ako je ugaona brzina relativno niska, osovina se može podijeliti na veći broj reflektujućih i tamnih segmenata, čime se proporcionalno povećava preciznost mjerenja. Ovim sistemom je moguće mjeriti visoke ugaone učestanosti do 300000 obrtaja u minuti.

MJERENJE UGAONE BRZINE OTPOELEKTRONSKI SENZORI



Kod senzora na slici, na osovину je pričvršćen disk, tzv. čoper, koji je po obimu podijeljen na providne i neprovidne sektore. Neprovidni sektori presijecaju svjetlost koja iz svjetlosnog izvora pada na detektor. Disk se može podijeliti na više od stotinu sektora što omogućava mjerenje i vrlo niskih ugaonih učestanosti. Čoper u suštini predstavlja jednostavnu varijantu inkrementalnog ugaonog enkodera.

MJERENJE UGAONE BRZINE HALL-OVI SENZORI



$$U_H = K_H \frac{BI_H}{d}$$

Osjetljivi element je poluprovodnička pločica, kroz koju se propušta konstantna struja I . Kada se pločica nalazi u homogenom magnetnom polju indukcije B , na bočnim krajevima pločice indukuje se napon U_H :

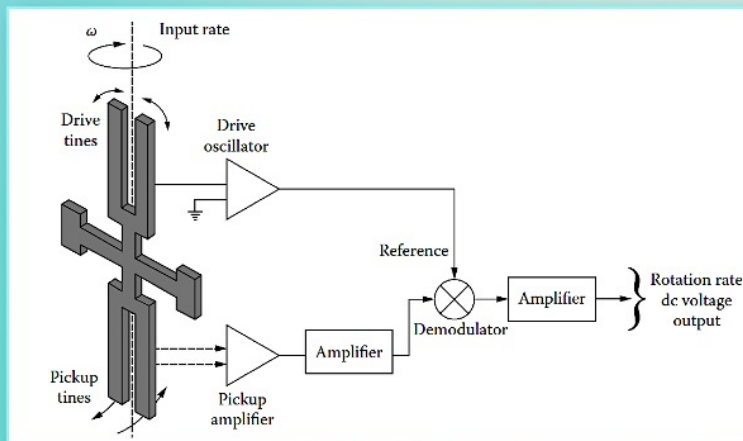
$$U_H = K_H \frac{BI_H}{d}$$

pri čemu je K_H Hall-ova konstanta dok je d debljina pločice.

Senzor za mjerenje ugaone brzine se sastoji od stalnog magneta i magnetskog kola čija se otpornost periodično mijenja prilikom obrtanja osovine. Hall-ov senzor se nalazi u vazдушном procjepu tako da prilikom rotacije dolazi do periodičnih

promjena magnetne indukcije čime se generišu naponski impulsi. Učestanost ovih impulsa je direktno proporcionalna ugaonoj brzini. Amplituda impulsa je konstantna i ne zavisi od ugaone brzine što predstavlja osnovnu prednost *Hall*-ovih senzora u odnosu na elektrodinamički senzor ugaone brzine sa stalnim magnetom.

MJERENJE UGAONE BRZINE ŽIROSOP

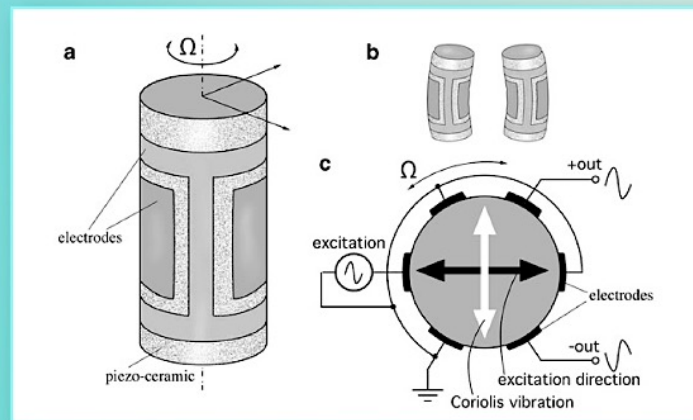


Veliki broj senzora za mjerenje ugaone brzine se bazira na kristalu kvarca i piezoelektričnom efektu. Kvarcni element osciluje svojom prirodnom učestanošću. Ugaono kretanje izaziva sekundare vibracije koje su (nakon demodulacije) proporcionalne ugaonoj brzini.

Primjer žiroskopa koji se bazira na piezoelektričnim vibracijama je prikazan na slici. Vibrirajuća kvarcna viljuška služi kao senzor ugaone brzine. Kao posljedica *Coriolis*-ovog efekta, rotaciono kretanje oko podužne ose senzora generiše DC napon na izlazu proporcionalan brzini rotacije. Oscilator pobuđuje *drive* krake viljuške tako da se oni pomjeraju jedan u odnosu na drugi (ka i od) visokom učestanošću. Na svaki krak djeluje *Coriolis*-ova sila u pravcu upravnom na ravan viljuške. Kako je trenutna brzina prostoperiodična, obrtni moment je takođe prostoperiodična

funkcija iste učestanosti kao i frekvencija pobudnog oscilatora. *Pickup* kraci odgovaraju na obrtni moment pomjerajući se kako je prikazano na slici. Signal na izlazu se pojačava, demoduliše i dobija se DC napon proporcionalan brzini rotacije.

MJERENJE UGAONE BRZINE ŽIROSKOP



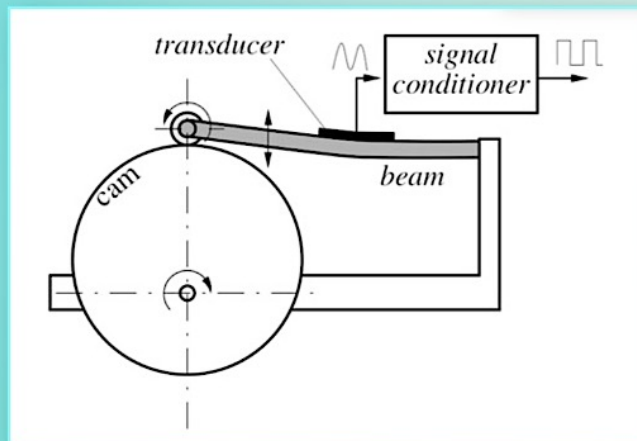
Kvarcni senzori ugaone brzine zamijenili su klasične žiroskope na bazi rotirajućeg točka zbog svojih minijaturnih dimenzija, niže cijene i veće pouzdanosti. Koriste se za kontrolu ugaone brzine u vazдушnom saobraćaju, robotici, hidrauličnoj opremi, za navigaciju podvodnih plovila, uređajima za stabilizaciju kamera, sistemima za virtuelnu realnost, kontrolerima video igara.

Primjer savremenog vibrirajućeg žiroskopa je prikazan na slici. U obliku je piezoelektričnog cilindra (0.8 mm prečnik i 9 mm dužina) sa šest elektroda.

Dizajn se bazira na reverzibilnosti piezoelektričnog efekta. Pobudnim elektrodama se dovodi AC napon iz eksternog oscilatora. To dovodi do savijanja cilindra u pravcu označenom crnim strelicama. Kada cilindar rotira oko svoje vertikalne ose, *Coriolis*-ova sila ga savija u pravcu označenom bijelim

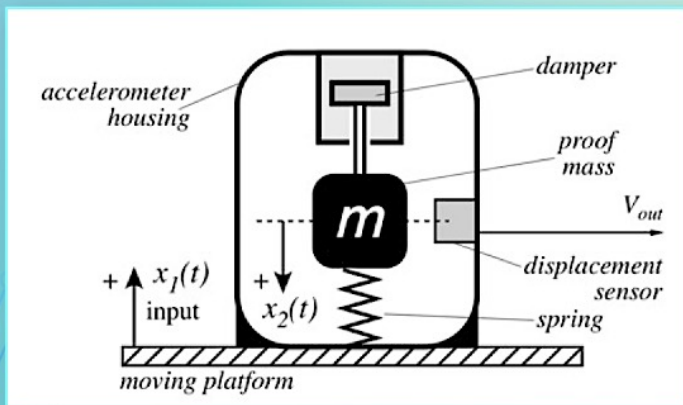
strelicama. Većoj ugaonoj brzini odgovara veća fleksija. Savijanje cilindra pod uticajem rotacije dovodi do indukovanja naelektrisanja u piezoelektriku, odnosno, do napona na *pick-up* elektrodama: +out i –out su prostoperiodični naponi u protivfazi. Ovi naponi se dalje procesiraju kako bi se konačno odredila ugaona brzina.

TAHOMETAR SA FLEKSIBILNOM GREDOM



Na slici je prikazan tahometar sa ekscentričnim točkom (*cam*). Dok rotira, točak savija otpornu gredu čiji suprotan kraj je pričvršćen za potporna strukturu. Za greda je zalijpljena mjerna traka ili piezoelektrični element. Kada se greda savija prema gore i prema dolje, na izlazu se generiše periodičan signal čijim procesiranjem se može odrediti ugaona brzina točka.

MJERENJE UBRZANJA



$$F = ma = k\Delta x = k(x_2 - x_1)$$

$$x_2 - x_1 = \frac{m}{k}a$$

$$S = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_0^2}$$

Mjerenje ubrzanja je značajno pri ispitivanju motornih vozila, liftova i drugih transportnih sredstava. Od značaja su mjerenja ubrzanja u eksperimentima sudara vozila i u drugim simulacijama u kojima se ispituje mehanička izdržljivost vozila i procjenjuje opasnost kojoj su pri sudaru izloženi vozač i putnici.

Industrijski proizvodi, kao na primjer elektronski uređaji ispituju se testovima slobodnog pada sa određene visine i vibracijama. Time se otkrivaju skriveni nedostaci kao što su na primjer nesigurni kontakti, hladni spojevi pri lemljenju itd. Kao mjera sila koje pri potresu djeluju na ispitivani predmet uzima se ubrzanje.

Linearni akcelerometri pripadaju grupi inertnih senzora koji ne zahtijevaju referenciranje u odnosu na stacionarni koordinatni

sistem. Postavljaju se na pokretnu platformu. Kod uređaja za navigaciju, akcelerometar se koristi u kombinaciji sa žiroskopom (obično po tri za sve tri ose) za određivanje ugaone brzine i linearnog ubrzanja. Na osnovu izlaza ovih uređaja, moguće je pratiti poziciju i orijentaciju pokretnog objekta.

Akcelerometri se koriste za mjerenje ubrzanja koje nastaje kao posljedica izlaganja objekta eksternim silama, među kojima je i gravitaciona sila. Dok je gravitaciona sila obično konstantna usmjerena prema centru gravitacije masivnog objekta, druge sile mogu varirati u intenzitetu i pravcu djelovanja, kao i u smislu frekventnog opsega. Dakle, zadatak akcelerometra je da odgovori na različite forme ubrzanja – od konstantnog prema sporo promjenljivom do jakih udara i vibracija.

Jednoosni akcelerometar je uređaj sa jednim stepenom slobode. Sastoji se od seizmičkog elementa mase m , opruge, okvira sa prigušivačem (*damper*) i senzora pomjeraja. Kućište akcelerometra se povezuje na pokretnu platformu, slika. Opruge omogućavaju seizmičkom elementu da se pomjera gore-dolje. Seizmički element je povezan sa prigušivačem i senzorom pomjeraja. Prigušivač usporava pokrete seizmičkog elementa, dok senzor pomjeraja određuje poziciju u odnosu na neutralni položaj (bez ubrzanja).

Platforma povezana sa kućištem akcelerometra može da bude stacionarna ili da se pomjera po x osi. Razmotrimo slučaj kada se pomjeraj mijenja po paraboličnom zakonu, slika. Sistem se kreće prema gore brzinom v koja se linearno mijenja u vremenu, dok je ubrzanje a odskočna funkcija što pokušavamo da izmjerimo. Kada kretanje otpočne, seizmički element zbog inercije ima težnju da ostane u početnom položaju naprežući oprugu silom F , sabijajući je za $\Delta x = x_2 - x_1$. Opruga se

suprotstavlja sili F , što znači:

$$F = ma = k\Delta x = k(x_2 - x_1)$$

pri čemu je k krutost opruge. Iz prethodnog izraza slijedi da je pomjeraj seizmičkog elementa:

$$x_2 - x_1 = \frac{m}{k} a$$

gdje se:

$$S = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_0^2}$$

označava kao statička osjetljivost akcelerometra.

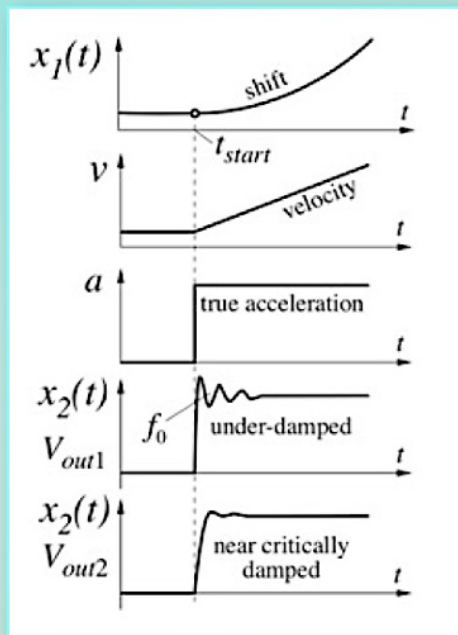
Na osnovu prethodne relacije može se zaključiti da se povećanje prirodne (rezonantne) učestanosti opruge može ostvariti povećanjem krutosti opruge ili smanjenjem mase seizmičkog elementa. Takođe se može zaključiti da je akcelerometar manje osjetljiv ukoliko je njegova prirodna učestanost veća.

Integraljenjem se može dobiti brzina u funkciji vremena, uz poznatu početnu brzinu.

Jednostavnost koncepta je evidentna, a kako je u pitanju integraljenje, ne postoji problem sa „numerički“ izazvanim šumom kao u slučaju metoda koje se baziraju na „diferenciranju pomjeraja“. Ipak, postoji nekoliko ograničenja na koja treba obratiti pažnju:

- Početna brzina mora biti poznata. Greška u mjerenju ove veličine učestvuje kao konstanta u ukupnoj grešci mjerenja.
- *Zero shift* na izlazu akcelerometra će se kao konstanta integraliti, što dovodi do linearnog povećanja greške sa vremenom.
- Ograničen frekventni opseg mjernog uređaja.
- Problem stabilnosti.

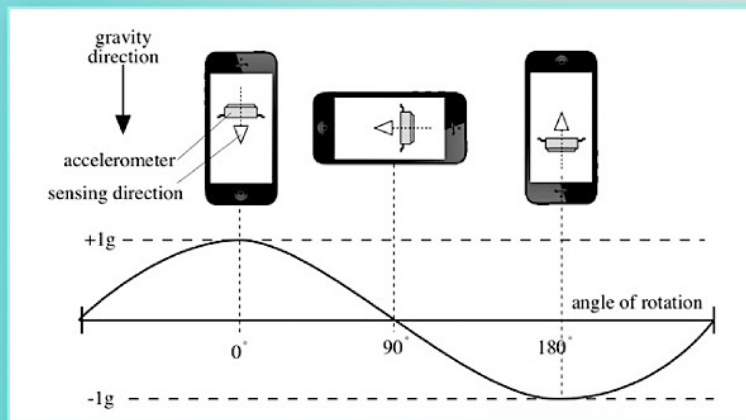
MJERENJE UBRZANJA



Kada dođe do ubrzanja, seizmički element sabija oprugu djelujući na nju silom F . U jednom trenutku, opruga će „odgurnuti“ seizmički element prema gore. Potom će opet doći do sabijanja, pa istežanja opruge, naizmjenično. Drugim riječima, seizmički element osciluje. Kako bi se kompenzovale neželjene oscilacije seizmičkog elementa, povezan je na prigušivač koji usporava kretanje seizmičkog elementa. U zavisnosti od specifične primjene, seizmički element, opruga i prigušivač treba da budu pažljivo odabrani. Obično se kao prigušivač koristi silikonsko ulje. Prigušivač je pogotovo značajan kada su u pitanju frekvencije bliske sopstvenoj učestanosti. U slučaju znatno nižih frekvencija, umjesto mehaničkog prigušivača, može se koristiti hardverski ili softverski implementiran nisko-propusni filter.

Korektno dizajniran, instaliran i kalibrisan akcelerometar treba da ima jednu jasnu prirodnu učestanost, i ravnu amplitudno-frekventnu karakteristiku za opseg učestanosti od interesa.

INKLINOMETRI

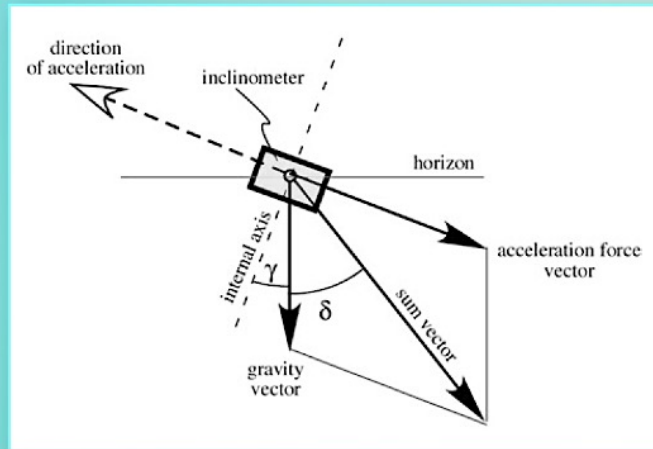


Detektori inklinacije se koriste u kopnenim i vazдушnim vozilima, prilikom konstrukcije puteva, za razne mašinske alate, za navigacione sisteme, za kontrolu orijentacije slike kod pametnih telefona i tableta, u robotici i ostalim primjenama koje zahtijevaju gravitacionu referencu.

Gravitacija Zemlje se karakteriše konstantnom silom koja je usmjerena prema centru Zemlje i izaziva ubrzanje g . Jedna od značajnih primjena akcelerometra je utvrđivanje pravca gravitacije. Taj specijalan tip akcelerometra se označava kao inklinometar ili detektor nagiba (*tilt detector*). Dakle, ukoliko se želi detektovati intenzitet i pravac gravitacione sile, koristi se senzor ubrzanja. Uređaj treba da bude osjetljiv po sve tri ose, kao i da detektuje slobodan pad. Primjer primjene kod pametnih telefona prikazan je na slici. Rotiranjem pametnog

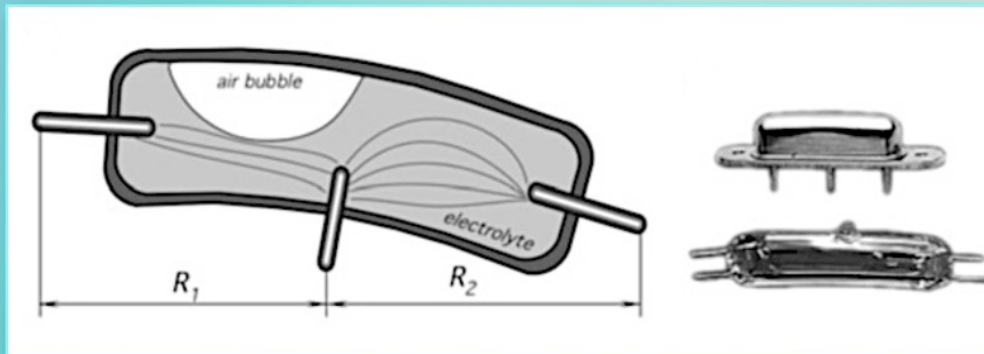
uređaja oko jedne ose, dobija se signal kako je prikazano na slici.

INKLINOMETRI



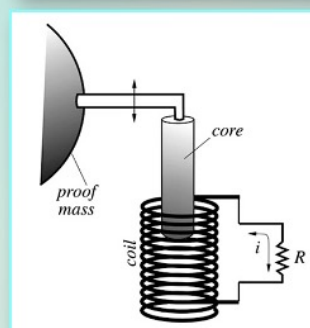
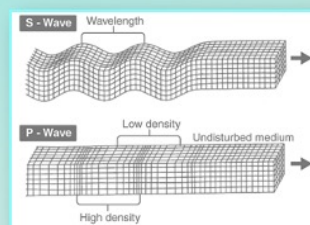
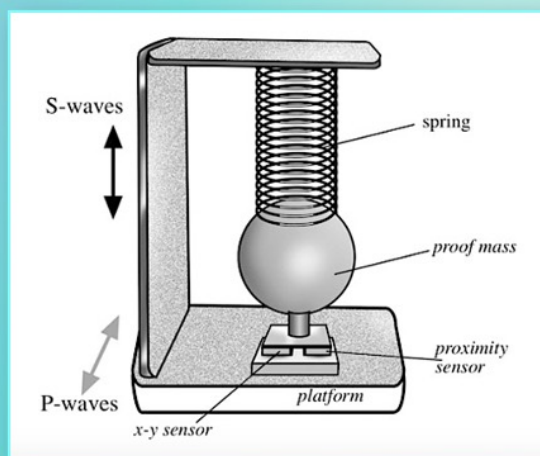
Kada se inklinometar postavi na vozilo koje ubrzava, dolazi do greške jer odziv odgovara rezultantnoj sili, kako je prikazano na slici. Inklinometar nije u stanju da razdvoji ove dvije komponente. U stacionarnom stanju inklinometar mjeri ugao između svoje interne ose i gravitacionog vektora. Ukoliko vozilo na kome je akcelerometar ubrzava, doći će do greške, izražene uglom δ .

INKLINOMETRI



Za mjerenje inklinacije sa beskonačnom rezolucijom može se koristiti elektrolitski senzor nagiba prikazan na slici. Mala blago savijena cijev od stakla je ispunjena djelimično provodnim elektrolitom. Kako se senzor naginje, dolazi do pomjeranja malog vazdušnog mjehura u elektrolitu. Pomjeranjem mjehura mijenja se ekvivalentna električna otpornost između odgovarajućih priključaka senzora, slika. Mjerenjem otpornosti utvrđuje se nagib.

SEIZMIČKI SENZORI



Tektonske ploče, zbog veoma velike mase, karakteriše kretanje veoma niskih frekvencija u infrazvučnom opsegu. Seizmometri ili seizmografi sadrže iste bazne komponente kao i akcelerometri: seizmički element, opruge, senzore pomjeraja i prigušivače.

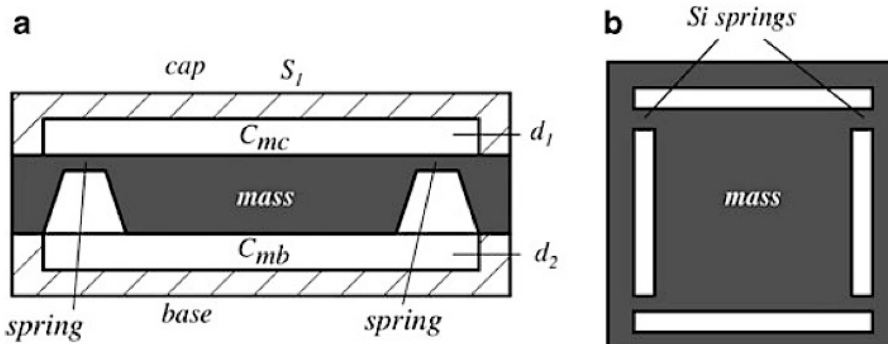
Kako je u pitanju veoma sporo kretanje, seizmički senzor treba da bude veoma osjetljiv, što znači da seizmički element treba da ima veliku masu, dok opruge treba da imaju što manji koeficijent krutosti ($S = m/k$). U toku mjerenja, pozicija seizmičkog elementa se smatra fiksnom (zbog izražene inercije), dok se platforma povezana za površinu Zemlje, pomjera. Ovakav tip senzora se koristi za detekciju zemljotresa i vibracija tla usljed ljudskih aktivnosti.

Postoje dvije vrste pomjeranja tla. Prvu vrstu karakterišu

elastični P-talasi koji se odnose na horizontalno pomjeranje tla pri čemu se mijenja gustina tla, usljed naizmjenične kompresije i širenja slojeva tla. P se odnosi na primarno jer se ovaj tip talasa brže prostire. P talasi se prostiru u pravcu deformacije tla. Drugu vrstu pomjeranja tla karakterišu S-talasi (sekundarni) koji se odnose na vibracije tla bez promjena gustine tla. Vibracija se dešava pod pravim uglom u odnosu na pravac prostiranja talasa. Na slici je prikazan koncept seizmometra baziranog na klatnu. Seizmički element velike mase koga podržavaju nježne opruge se može pomjerati vertikalno i horizontalno u zavisnosti od kretanja platforme koja je koja je povezna sa tlom. X-y senzor odgovara na P-talase, dok senzor blizine odgovara na S-talase u vertikalnom pravcu. Za mjerenje pomjeraja mogu se koristiti kapacitivni senzori, na primjer.

Seizmograf ima izraženu mehaničku rezonansu koja će dovesti do lažnih oscilacija ukoliko se ne priguši. Kao prigušivač se može koristiti mineralno ulje, ali i pristup prikazan na slici na bazi elektromagnetnog prigušivača. Pomjeranjem jezgra indukuje se struja kroz otpornik koja kreira svoje magnetno polje koje se suprotstavlja originalnom magnetnom polju usporavajući kretanje jezgra.

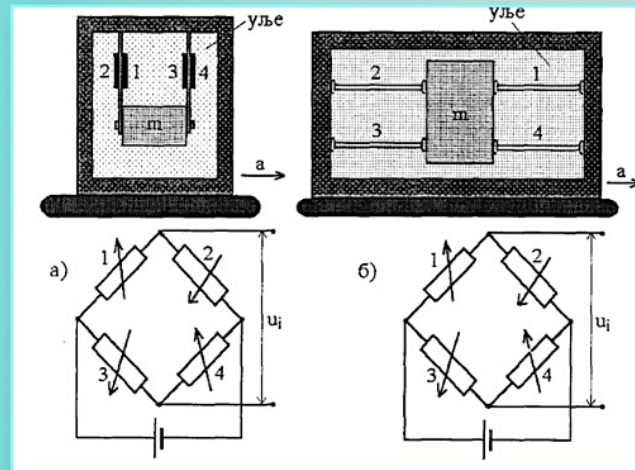
KAPACITIVNI AKCELEROMETRI



Dizajn akcelerometra zavisi od odabira senzora pomjeraja ili pretvarača za posmatranje pomjeranja seizmičkog elementa u odnosu na kućište. Kapacitivni pretvarači su dokazani kao pouzdani elementi pogodni za minijaturizaciju, visoke tačnosti i niske cijene. Jedna obloga kondenzatora se povezuje za seizmički element, dok se druga vezuje za kućište akcelerometra. Kapacitivnost kondenzatora je funkcija rastojanja između obloga kao i aktivne površine. U zavisnosti od dizajna, kapacitivnost se može mijenjati promjenom rastojanja između obloga kondenzatora ili promjenom aktivne površine. Za male pomjeraje seizmičkog elementa kapacitivnim pretvaračem potrebno je ostvariti dobru kompenzaciju što se najčešće postiže upotrebom diferencijalnog kapacitivnog senzora.

Na slici je prikazan poprečni presjek MEMS kapacitivnog akcelerometra gdje je seizmički element „u sendviču“, okružen poluprovodničkim oprugama (slika b). Površina ploče pločastog kondenzatora kapacitivnosti C_{mc} između seizmičkog elementa i *cap* elektrode je S_1 . Rastojanje između ploča d_1 se smanjuje za Δ kada se seizmički element kreće prema gore. Drugi kondenzator kapacitivnosti C_{mb} , između seizmičkog elementa i *base* elektrode ima površinu ploča S_2 . Kada se seizmički element kreće prema gore, rastojanje između obloga kondenzatora d_2 se povećava za Δ . Mjerenjem pomjeraja može se odrediti traženo ubrzanje.

PIEZOREZISTIVNI AKCELEROMETRI

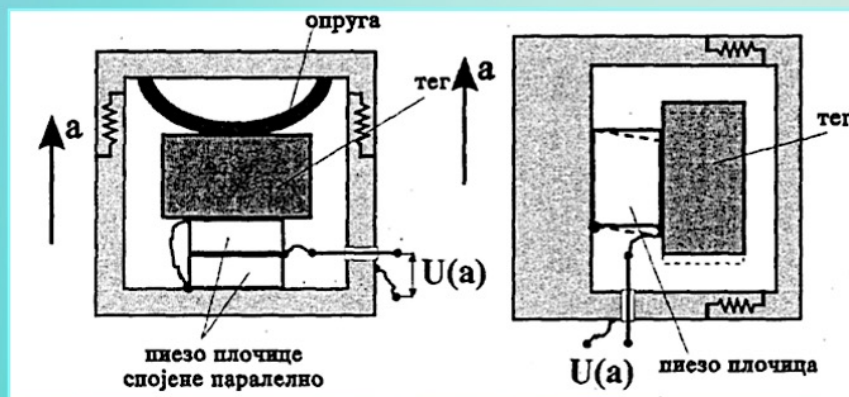


Važna grupa akcelometara koristi kao senzore lijepljene ili slobodne mjerne trake. Pretvarač sa slike a) se sastoji od elementa mase m pričvršćenog za kućište pomoću dvije elastične konzole. Na konzolama su po dvije mjerne trake spojene u most sa četiri aktivne grane. Pri stalnom horizontalnom ubrzanju seizmički element djeluje silom $m \cdot a$ koja elastično savija konzole sa trakama čime se dobija izlazni signal linearno srazmjeran ubrzanju. U akcelometrima se koriste i poluprovodničke mjerne trake kojima se dobija veća osjetljivost i manje dimenzije pretvarača u odnosu na konstrukcije sa metalnim trakama.

Pretvarači za mjerenje ubrzanja sa slobodnim mjernim trakama, šematski prikazani na slici b), karakterišu se malom masom od

oko nekoliko desetina grama, a samim tim i velikom graničnom učestanošću. Slobodne mjerne trake istovremeno imaju ulogu senzora i elastičnog elementa (pored traka mogu postojati i dodatne opruge). Pri ubrzanju normalnom na pravac prostiranja traka, sve trake se podjednako istežu što se u mostu sa četiri aktivne grane kompenzuje. Mjerenje normalnih komponenti ubrzanja vrši se pomoću tri upravno postavljena pretvarača, pri čemu svaki od njih mjeri po jednu komponentu ubrzanja.

PIEZOELEKTRIČNI AKCELEROMETRI



Piezelektrični akcelerometri se primjenjuju za mjerenje ubrzanja kod vibracija i impulsnih pojava kao što su udari ili eksplozije. Osnovni djelovi pretvarača su jedna ili nekoliko piezelektričnih pločica i seizmički element mase m . Pri ubrzanju a seizmički element djeluje inercijalnom silom $F = -ma$, generišući na pločicama proporcionalnu količinu elektriciteta. Na prvoj slici prikazan je akcelerometar kompresionog tipa, dok je na drugoj slici prikazan akcelerometar smičućeg tipa. Kod kompresionog pretvarača upotrijebljene su dvije keramičke piezelektrične pločice postavljene jedna iznad druge. Na njih djeluje ista inercijalna sila seizmičkog elementa. Smjerovi polarizacije pločica su suprotni. U električnom smislu, pločice su spojene paralelno. Ovom konstrukcijom su otklonjeni problem u pogledu eventualnog kratkog spoja pločica preko ostalih

komponenti pretvarača, a dobija se i dva puta veća količina elektriciteta.

Kod kompresionog pretvarača pri vertikalnom ubrzanju inercijalni element izaziva debljinsku deformaciju pločice. Pločica i seizmički element pričvršćuju se međusobno lijepljenjem, lemljenjem, ili pomoću čvrste opruge, pa pretvarač može da mjeri ubrzanja u oba smjera.

Kod pretvarača smičućeg tipa pri vertikalnom ubrzanju pločica trpi smičuće deformacije.

Kod spajanja keramičke piezoelektrične pločice i seizmičkog elementa lemljenjem, usljed visoke temperature pločica obično gubi svoju polarizaciju. Ponovna polarizacija se vrši tako što se pločica priključi na napon, pretvarač se pri tome hladi počev od temperatura viših od Kirijeve temperature do sobne temperature.

Piezoelektrični akcelometri se zbog stabilnih karakteristika koriste kao sekundarni etaloni.

LITERATURA

- Dragan Stanković, *Fizičko-tehnička mjerenja, Senzori*, Univerzitet u Beogradu, 1997 (poglavlje 5)
- Ramon Pallas-Areny, John G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, John Wiley and Sons, 2nd edition, 2001 (poglavlje 8.1)
- Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*, 5th edition, Springer, 2016 (poglavlje 9)

LINKOVI

- https://www.youtube.com/watch?v=cquvA_lpEsA
- <https://www.britannica.com/video/181934/rock-vibrations-Earth-earthquake-waves-P-surface>
- <https://www.youtube.com/watch?v=eqZgxR6eRjo>
- <https://www.youtube.com/watch?v=k2GQVJ4z0kM&t=14s>
- <https://www.youtube.com/watch?v=-Qk--Sjgq78>
- <https://www.youtube.com/watch?v=j-u3lEgcTiQ>
- <https://www.youtube.com/watch?v=UA1qG7Fjc2A>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YeXlmdlXp2s>