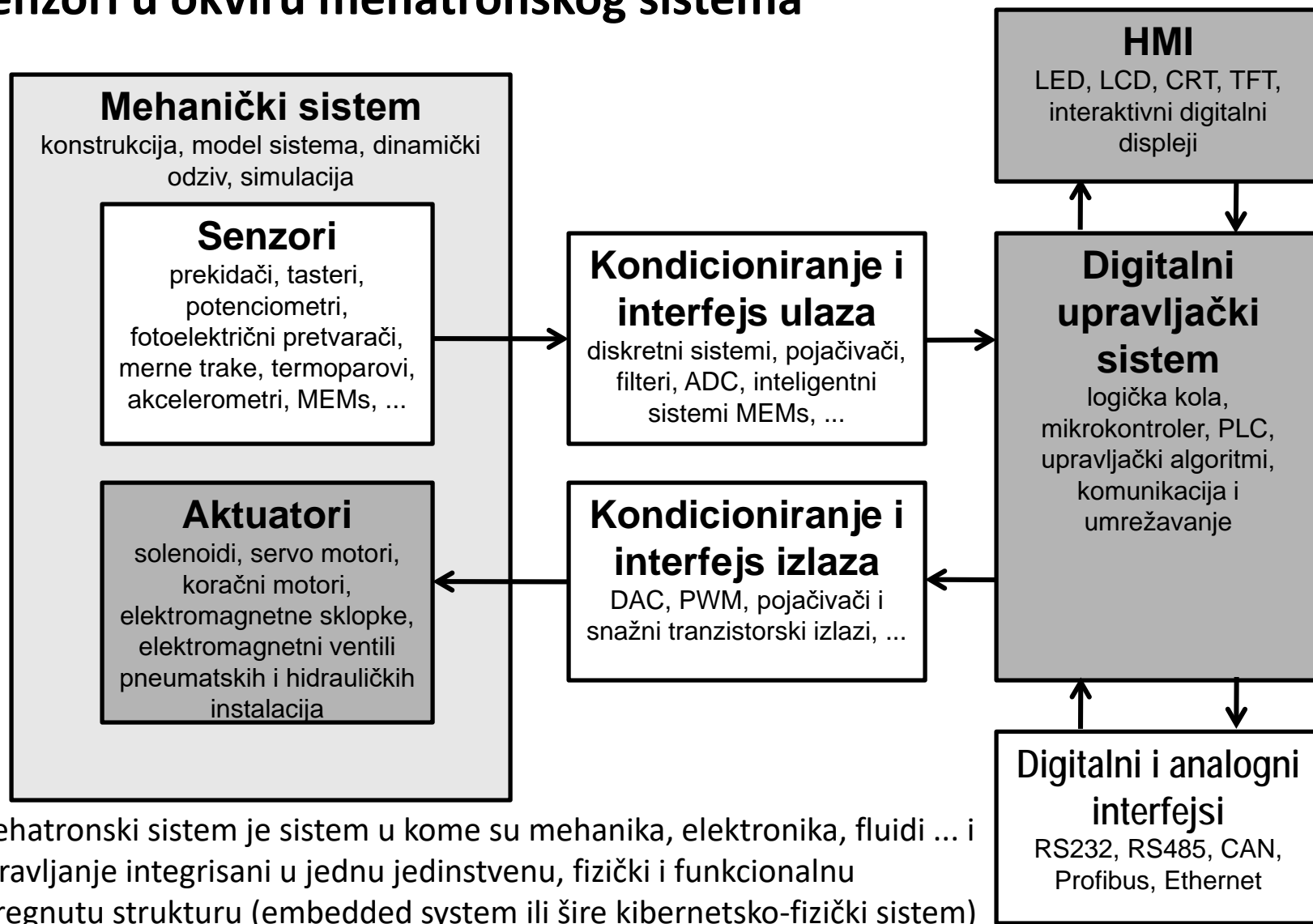


modul b

Senzori i obrada signala



Senzori u okviru mehatronskog sistema



Mehatronske sistem je sistem u kome su mehanika, elektronika, fluidi ... i upravljanje integrisani u jednu jedinstvenu, fizički i funkcionalnu spregnutu strukturu (embedded system ili šire kibernetiko-fizički sistem)

U okviru ovog modula razmatraju se senzorski sistemi neophodni za interakciju digitalnog računara sa njegovim okruženjem. Da bi se ostvarila interakcija sa okruženjem neophodan je rad sa digitalnim i analognim signalima koji se dovode na ulazne i izlaze fizičke kanale digitalnog računara, kao i rad sa fizičkim kanalima koji omogućavaju umrežavanje, odnosno digitalnu komunikaciju sa drugim mikroprocesorskim sistemima, uključujući inteligentne senzore i HMI (*Human-Machine Interaction*) sisteme za interakciju operatora sa mehatronskim sistemom.

Materija koja se obrađuje u okviru ovog modula obuhvata sledeće celine

- b1: Princip električnih merenja neelektričnih veličina, poluprovodnici i kondicioniranje signala;
- b2: Diskretni signali, digitalni ulazni i izlazni kanali, digitalni senzori i aktuatori;
- b3: Analogni senzori;
- b4: Analogni signali i akvizicija senzorskih signala primenom kompjutera –analogno / digitalna i digitalno / analogna konverzija, osnove digitalne obrade signala (DFT, FFT, STFT, frekventni spektar, filtracija);
- b5: Sistemi veštačkog gledanja;
- b6: Digitalni interfejs i umrežavanje digitalnih računara.

**b1: električna merenja neelektričnih veličina,
poluprovodnici i kondicioniranje signala**

Merni sistemi - struktura

Ključni sadržaj većine mehatronskih sistema je **merni sistem**, koji se sastoji iz tri osnovna elementa:

Pretvarač - element koji prevodi neku fizičku veličinu u električnu

Kondicioner - element koji obezbeđuje uslove za rad pretvarača i vrši primarnu obradu signala koje generiše pretvarač;

Sistem za akviziciju - vrši preuzimanje senzorskih signala i njihovo memorisanje, opciono, ukoliko su senzorski signali analogni, vrši se konvertovanje u digitalni oblik, prikaz i prosledjivanje podataka nekom drugom digitalnom sistemu.

U zavisnosti od konkretnog slučaja primene, navedeni gradivni elementi senzorskog sistema se sreću u vrlo različitim oblicima uz primenu različitih tehnologija i tehničkih rešenja.

U praksi se vrlo često poistovećuje pojam pretvarača i pojam senzora, ili kombinacije pretvarač-kondicioner i pojam senzora. U ovom kursu se pod senzorom podrazumeva kombinacija pretvarača i kondicionera.



Merni sistemi – princip funkcionisanja

Osnovni princip funkcionisanja senzorskih sistema, koji se široko primenjuju u industrijskoj praksi, zasniva se na električnom merenju neelektričnih veličina. Većina senzora spada u klasu mehatronskih sistema. Mehanika, elektronika i, posebno kod savremenih senzora, softver, su simbiotski spregnuti u jednu funkcionalno nerazdvojivu celinu.

Sklop pretvarača se tako projektuje da sa jedne strane obezbedjuje funkciju direktne ili indirektno reakcije na fizičku veličinu koja se meri, a sa druge strane obezbedjuje prevodjenje te reakcije u neku električnu veličinu, kao što je otpornost, induktivitet, kapacitet ili naelektrisanje, a zatim, u određenom elektronskom sklopu u napon ili struju.

Polazni zadatak u projektovanju senzora je pažljiv izbor skupa fizičkih veličina koje će obezbediti prevodjenje fizičke veličine koja se meri u njoj ekvivalentnu električnu veličinu. Ova veza mora da bude tako izabrana da:

1. uvek obezbedjuje determinističku zavisnost i da ta zavisnost bude linearna, ili sa poznatim zakonom nelinearnosti,
2. dovoljnu senzitivnost (osetljivost) na veličinu koja se meri,
3. dovoljnu robusnost (neosetljivosti) na poremećaje,
4. stabilnost i stacionarnost parametara , i
5. minimalni uticaj na objekat merenja.

Na primer, kod merenja sile kao jedne od osnovnih mehaničkih veličina, susrećemo se sa problemom da je silu nemoguće direktno meriti. **Sila je apstraktni koncept**, kroz koji se izražava mera dinamičke interakcije dva mehanička sistema (Njutnov zakon) ili neki drugi oblici mehaničke interakcije fizičkih objekata. Zato pretvarač treba projektovati tako da silu meri na indirektan način, preko reakcije mehaničkog sistema na njeno delovanje. U praksi se pretvarači za senzore sile projektuju tako da registruju pomeraj elastične strukture na koju deluje sila čiji se intenzitet meri. Dakle, sila se ne meri direktno, već indirektno, preko pomeraja elastične strukture koji nastaje kao posledica dejstva te sile.

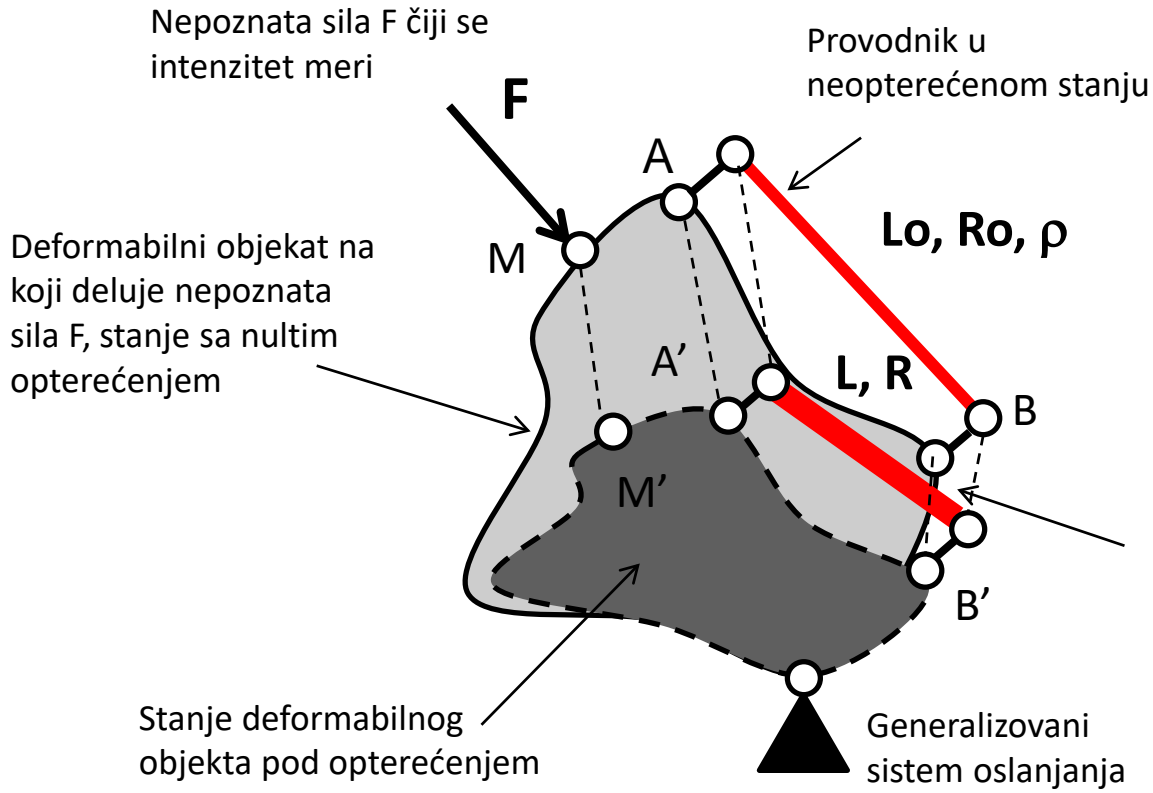
Bitno je ovde da veza izmedju pomeraja i sile bude linearna, ili ukoliko to nije moguće, onda da je nelinearni zakon preslikavanja apriori poznat.

Pretvarač koji u ovom konkretnom slučaju registruje pomeraj, treba da izvrši konverziju pomeraja u neku električnu veličinu. Ovde postoji veliki broj mogućnosti.

Ukoliko se na primer, pomeraj deformabilne strukture poveže sa nekim električnim provodnikom, onda će i taj provodnik takodje da bude deformisan. Iz fizike je poznato da je otpor nekog provodnika definisan relacijom $R = \rho_0 * L / S$, gde je sa L označena dužina provodnika, sa S njegov poprečni presek, a konstanta ρ_0 označava specifičnu otpornost kao fizičku karakteristiku materijala od koga je provodnik izradjen.

Deformisanjem provodnika dolazi simultano do promene njegove dužine i poprečnog preseka. Ove promene se odvijaju u opozitnom smeru, odnosno kada se dužina povećava smanjuje se poprečni presek i obrnuto. Ovo se izučava u okviru otpornosti materijala. Promenom dužine i preseka menja se i otpornost. Na taj način se deformacija objekta na koji deluje nepoznata sila prevodi u promenu otpora pretvarača koji je mehanički povezan sa tim objektom. Ovim je konverzija ostvorena.

Promene neelektrične veličine kao što je sila u ovom slučaju, indirektno se prevode u promenu otpora. Promena otpora se lako može prevesti u promenu napona kao jedne od osnovnih električnih veličina koja se meri širokom lepezom tehnika.



$$\Delta L = L_0 - L$$

$$\Delta L = f_1(F)$$

$$\Delta R = R_0 - R$$

$$\Delta R = f_2(\Delta L)$$

$$\Delta R = f_2(f_1(F))$$

$$F = f_3(\Delta R)$$

Zbog smanjenja dužine provodnika povećava se otpor. Povećanje otpora je proporcionalno povećanju dužine, odnosno proporcionalno deformaciji objekta na koji deluje sila. Ukoliko su deformacije linearno zavisne od sile, a Hukov zakon upravo to tvrdi: $\sigma = E \cdot \epsilon$, $\epsilon = \Delta L / L_0$, $\sigma = F / S$, onda sledi da će promena otpora takodje biti linearno zavisna od sile, odnosno: $F = E \cdot S \cdot \Delta L / L_0 = G \cdot (R_0 - R) = G \cdot \Delta R$, pri čemu je sa G označena neka zbirna konstanta koja uzima u obzir specifičnu provodnost pretvarača, geometrijska svojstva i svojstva materijala od koga je izradjen deformabilni objekat na koji deluje nepoznata sila.

Konverzija neelektrične fizičke veličine u električnu dalje nameće potrebu rešavanja zadatka merenja same električne veličine. Pored toga, promene električnih veličina u ovom slučaju su po pravilu ekstremno male što pored osnovnog nameće i dodatne zadatke, a to je njihovo dovođenje na nivo kojim se dalje može pouzdano manipulirati i istovremeno, da se u tom procesu pojačanja signala pod dejstvom različitih poremećaja ne unesu greške u merni sistem i šum.

Takodje, pretvarač zahteva određene uslove za njegovo funkcionisanje. U prethodno navedenom slučaju merenja sile, provodnik treba napajati naponom velike stabilnosti i neosetljivosti na različite poremećaje koje dolaze iz okruženja, posebno neosetljivost na varijacije temperature i uticaj elektromagnetnih smetnji.

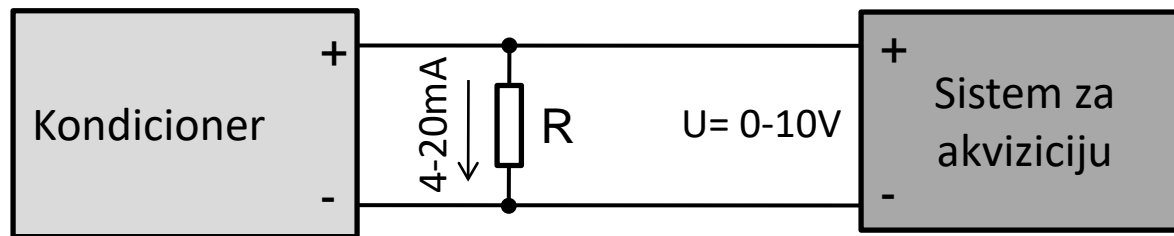
Na kraju, senzorski signal mora da bude doveden na neki standardizovani nivo, koji će omogućiti njegovu dalju obradu na standardnoj opremi. Razlikujemo dve vrste standardnih senzorskih izlaza u analognom domenu:

1. Naponski,
2. Strujni.

Standarizovani naponski nivoi signala na izlazu iz kondicionera su +/- 5V ili +/- 10V (simetrični), i 0-5V ili 0-10V asimetrični.

Kada se govori o strujnom izlazu, onda tu postoje dva standarda: 0-20 mA i 4-20mA. U slučaju izlaza 4-20mA deo opsega od 0-4mA se koristi za napajanje senzora i/ili registrovanje njegove funkcionalnosti.

Prevodjenje strujnog u naponski izlaz se realizuje uvodjenjem paralelno vezanog otpornika određene vrednosti koja se bira tako da pad napona na tom otporniku bude jednak željenom naponskom opsegu. Tako na primer, ukoliko želimo da kondicioner sa strujnim izlazom 4-20mA konvertujemo u naponski 0-10 V sledi da je $R = U / I = 10 / 0.02 = 500 \text{ Ohm}$ (pretpostavlja se da je ulazna otpornost kondicionera vrlo velika i da se njegov uticaj može zanemariti).



U slučaju strujnog izlaza 4 do 20mA, korisni opseg od 16 mA se deli na negativni deo analognog senzorskog signala: 4 do 12 mA i pozitivni deo analognog signala: 12 do 20 mA. Dakle ekvivalent nultom nivou signala koji generiše pretvarač je jednak 12 mA. Analogno, naponski interval 2 do 6V odgovara negativnom, a 6 do 10V pozitivnom signalu pretvarača; Nulti nivo je na 6V.

Prethodno navedeni zahtevi rešavaju se primenom elektronike, bazirane na tehnologiji poluprovodnika. Aktivnim poluprovodničkim elementima kondicionira se pretvarač i tako obezbedjuje osnovna funkcija senzorskog sistema. Pod pojmom kondicioniranje podrazumeva se niz aktivnih radnji koje treba da obezbede uslove za rad pretvarača i pojačavanje signala koje on generiše do nekog standardnog naponskog ili strujnog nivoa. Značaj aktivnih poluprovodničkih elemenata je suštinski za savremene senzorske sisteme. Taj značaj se prostire šire, na ukupnu tehnologiju mehatronskih sistema, tako da se slobodno može konstatovati da mehatronski sistemi kakve danas poznajemo ne bi postojali bez tehnologije aktivnih poluprovodničkih elemenata za kondicioniranje i kasnije obrade senzorskih signala.

ELEKTRONIKA

Fizičke osnove tehnologije poluprovodnika

Kada se govori o električnoj provodnosti fizika poznaje dve osnovne grupe materijala. Postoje provodnici, čiji se specifični otpor kreće u intervalu od 10^{-9} do 10^{-6} Ohm m (zlato, srebro, bakar, aluminijum, ... svi metali). Drugu grupu čine materijali koje nazivamo dielektricima, odnosno izolatorima, koji su vrlo loši provodnici i njihov specifični otpor se kreće u intervalu od 10^8 do 10^{18} Ohm m (keramika, guma, staklo, vazduh, polimeri,).

Medjutim, pored prethodno navedene dve osnovne grupe, fizika prepoznaje i treću grupu koja se po svojim svojstvima nalazi između provodnika i izolatora. Tu grupu materijala nazivamo poluprovodnicima i njihov specifični otpor se kreće u intervalu od 10^{-4} do 10^8 Ohm m. U grupu poluprovodnika spadaju prirodni elementi: silicijum, germanijum, bor, selen, kao i veliki broj jedinjenja metala i nemetala. Tu takodje spadaju i organski poluprovodnici, koji poseduju čitav spektar vrlo posebnih osobina u odnosu na neorganske (na primer OLED).

Specifična svojstva poluprovodnika pokazala su se vrlo pogodnim za primenu u elektronici. Na bazi ovih specifičnosti izgradjana je tehnologija poluprovodničkih elektronskih komponenti, koja predstavlja tehničku osnovu skoro svega što je povezano sa elektricitetom. Savremene informaciono-komunikacione tehnologije su u potpunosti bazirane na tehnologiji poluprovodnika.

Ohm: električni otpor provodnika kroz koji protiče struja od 1A i koji generiše pad napona od 1V (na provodnik ne deluje spoljašnja elektromagnetna sila).

Dopiranje poluprovodnika:

Poluprovodnici u čistom stanju su na apsolutnoj nuli (-273.15 C odnosno, 0K) neprovodni. Povećavanjem temperature dolazi do oslobadjanja valentnih elektrona (elektroni na spoljašnjoj orbiti). Oslobadjanjem valentnih elektrona u atomu nastaje 'šupljina' i on postaje pozitivno naelektrisan. Na taj način nastaju dve vrste nosioca naelektrisanja: **slobodni elektroni** koji su negativni i **šupljine** koje su pozitivni nosioci naelektrisanja.

Slobodni elektron se kreće i u nekom trenutku susedni pozitivno naelektrisani atom može da ga privuče i apsorbuje na valentnu orbitu i tako ponovo postane neutralan. Ova pojava se naziva **rekombinacija**. Lančani proces stvaranja slobodnih elektrona i proces rekombinacije dovodi do kretanja nosioca naelektrisanja i tako poluprovodnik postaje provodan.

Kod čistih poluprovodnika broj slobodnih elektrona je u ravnoteži sa brojem šupljina. Broj slobodnih elektrona i šupljina eksponencijalno raste sa povećanjem temperature.

Preciznim **ubacivanjem primesa**, odnosno atoma drugih elemenata u kristalnu strukturu čistog poluprovodnika remeti se prirodna ravnoteža nosioca naelektrisanja i tako značajno menjaju njegova električna svojstva. Ovaj proces se naziva **dopiranje**.

Poluprovodnik N-tipa je poluprovodnik kod koga se vrši **dopiranje donorima**, usled čega dolazi do pojave većeg broja slobodnih elektrona od broja šupljina. Tako na primer, ako se četvorovalentnom silicijumu dodaju primese u obliku petovalentnih atoma, na primer **petovalentni atomi arsena**, posle uspostavljanja stabilne veze sa susednim atomima silicijuma, peti valentni elektron ostaje slobodan. Nastala šupljina u atomu arsena se ne popunjava, pa tako dolazi do pojave viška elektrona. Pošto su elektroni negativni nosioci naelektrisanja, poluprovodnik sa ovako izmenjenim svojstvima se naziva poluprovodnik N-tipa.

Poluprovodnik P-tipa je poluprovodnik kod koga se vrši **dopiranje akceptorima**, usled čega dolazi do pojave većeg broja šupljina od broja slobodnih elektrona. Kao akseptori, koriste se atomi koji imaju manje valentnih elektrona od poluprovodnika koji se dopira. U slučaju silicijuma, dopiranje se može ostvariti **trovalentnim atomima bora**, što će posle uspostavljanja stabilnih veza sa susednim atomima silicijuma rezultovati viškom šupljina. Pošto su šupljine pozitivni nosioci naelektrisanja, poluprovodnik sa ovako izmenjenim svojstvima se naziva poluprovodnik P-tipa.

Dopiranjem odgovarajućom vrstom i količinom primesa, kontroliše se vrsta i količina nosioca naelektrisanja u nekom poluprovodniku. Kod poluprovodnika N-tipa postoji veća koncentracija negativnih nosioca naelektrisanja – slobodni elektroni. Kod provodnika P-tipa postoji veća koncentracija pozitivnih nosioca naelektrisanja – šupljine.

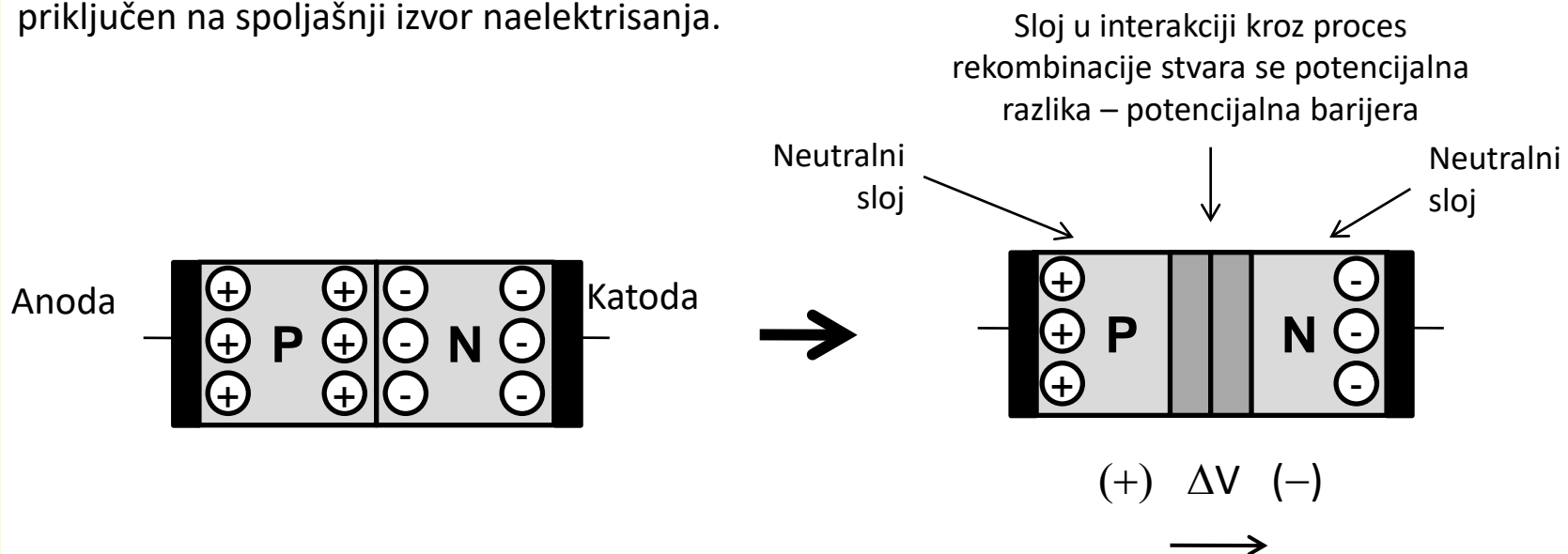
Kombinovanjem, odnosno interakcijom poluprovodnika N-tipa i poluprovodnika P-tipa nastaju različiti oblici **aktivnih poluprovodničkih elemenata**. Na ovom konceptu gradi se savremena elektronika.

PRAKTIČNA IMPLEMENTACIJA

Poluprovodnička dioda

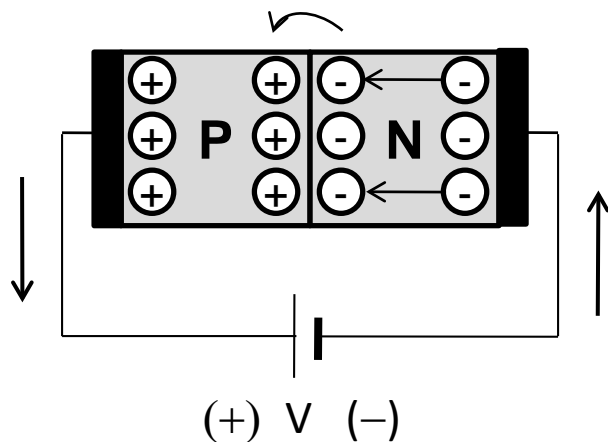
Spajanjem kristala poluprovodnika P-tipa i kristala poluprovodnika N-tipa nastaje P-N spoj, koji se u elektronici naziva poluprovodnička dioda.

Ovaj spoj poseduje specifična svojstva. U sloju poluprovodnika koji je udaljen od P-N spoja uspostavlja se neravnoteža nosioca naelektrisanja sa relativnom provodljivošću. U sloju koji je blizak P-N spoju dolazi do interakcije nosioca naelektrisanja, koji u procesu rekombinacije pokušavaju da se medjusobno neutrališu. Taj sloj je siromašan nosiocima naelektrisanja, neprovodan, i u njemu se uspostavlja potencijalna razlika, koja u slučaju kristala silicijuma iznosi 0.6 do 0.7 V. Bitno je uočiti da u prethodnoj analizi P-N spoj nije polarisan, odnosno nije priključen na spoljašnji izvor naelektrisanja.

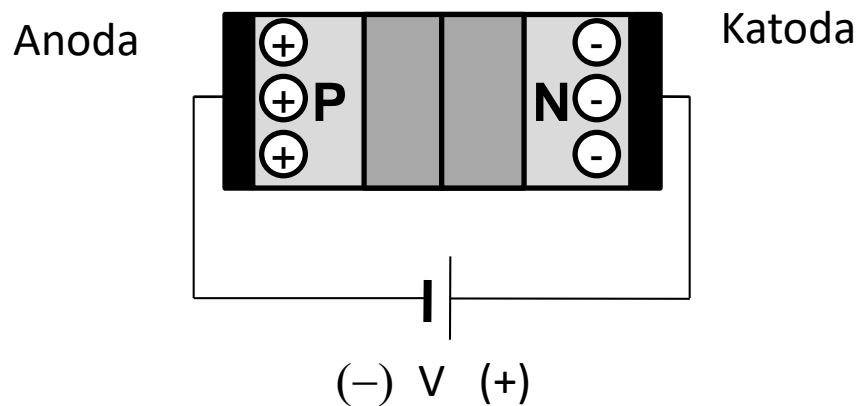


Kada se anoda i katoda P-N spoja polarišu, dolazi do fenomena usmerenog kretanja naelektrisanja. P-N spoj je u jednom smeru provodan a u drugom smeru neprovodan za spoljašnje nosioce naelektrisanja koje generiše izvor.

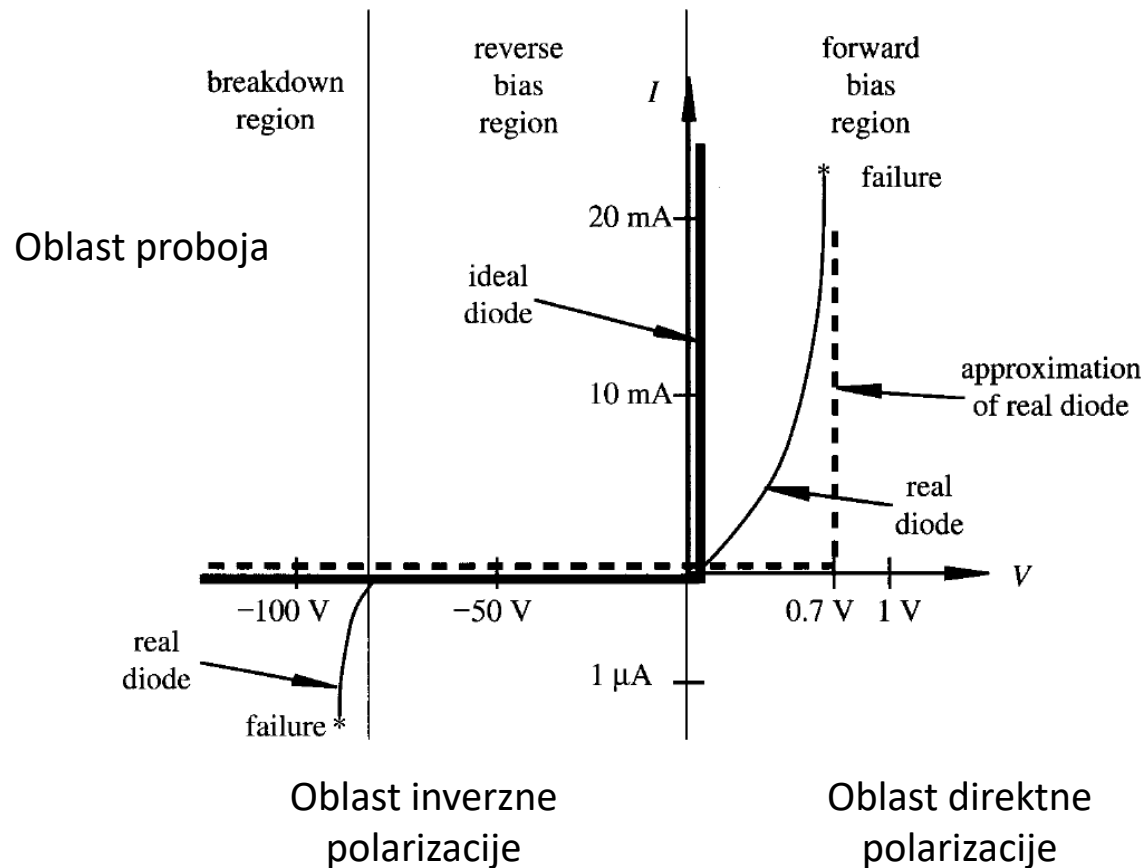
Provodno stanje



Neprovodno stanje
(‘inverzna polarizacija’)

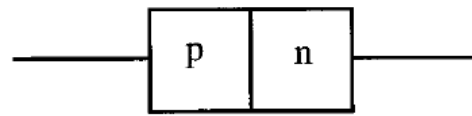


Naponsko-strujna karakteristika idealne i stvarne poluprovodničke diode



Anoda

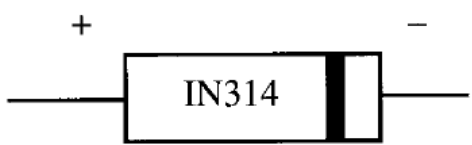
Katoda



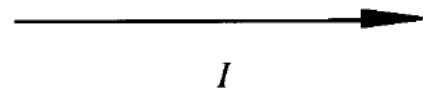
Fizička realizacija



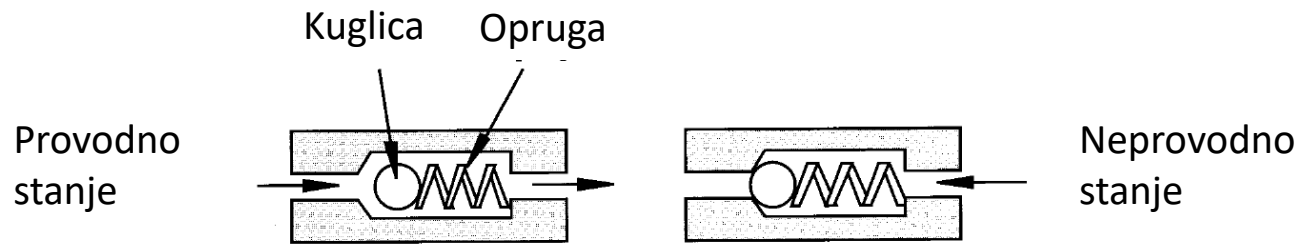
Simbol



Primer komercijalno
raspoložive komponente



Smer toka struje



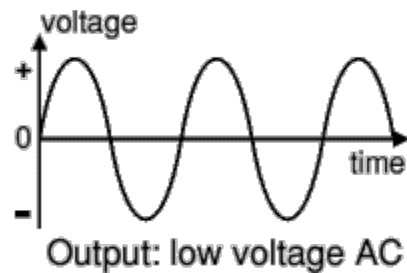
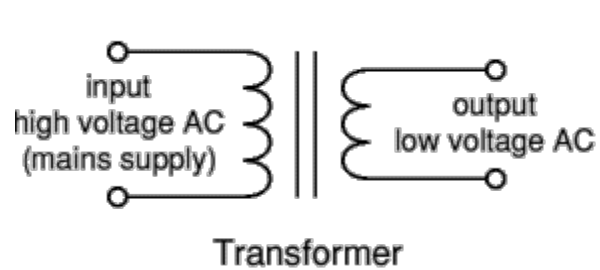
Provodno
stanje

Neprovodno
stanje

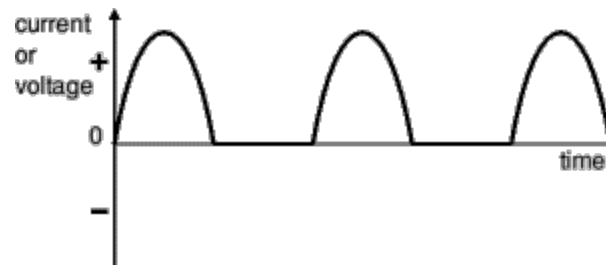
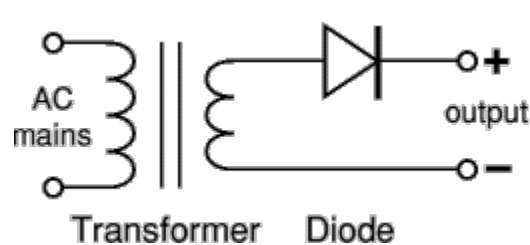
Analogija poluprovodničke diode i jednosmernog ventila

Primena diode i varijantni oblici

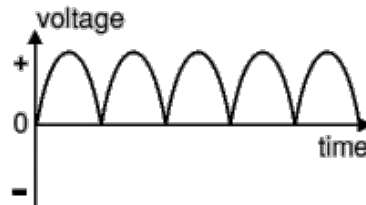
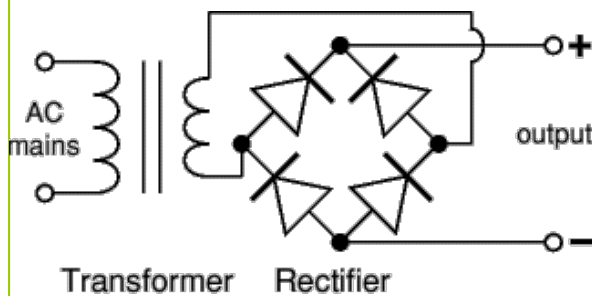
Ispravljači (usmerači):



Naizmenični (AC) izvor napajanja
Pomoću transformatora se na sekundaru ostvaruje željena vrednost naizmeničnog napona



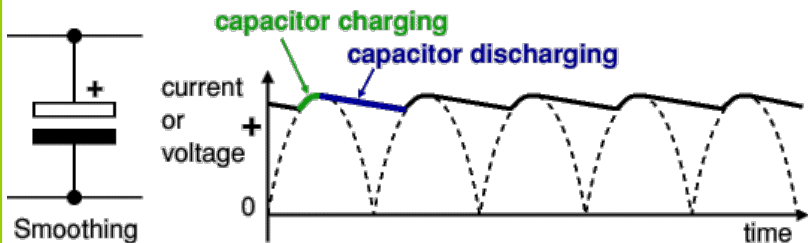
Ispravljač sa jednom diodom
Dioda propušta samo jednu poluperiodu; rezultat je pulzirajući napon na izlazu, izrazite neravnomernosti



Output: varying DC

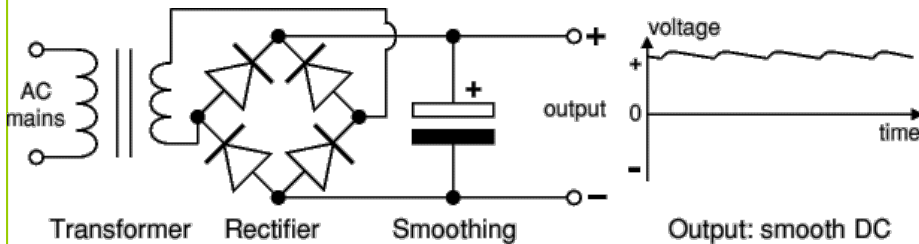
Mosni ispravljač sa četiri diode – Greco ispravljač

Mosna konfiguracija dioda propušta i usmerava obe poluperiode; U prikazanom slučaju dioda u gornjoj levoj grani provodi pozitivnu poluperiodu i dovodi je na plus pol ispravljača; kolo u negativnoj grani se zatvara kroz diodu u donjoj levoj grani; Negativna poluperioda naizmeničnog napona se provodi na ekvivalentan način sa preostale dve diode; rezultat je pulzirajući napon na izlazu manje neravnomernosti; Izvor naizmenične struje je u potpunosti iskorišćen.



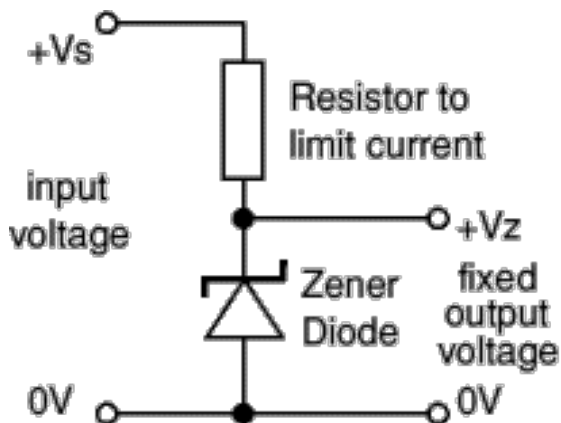
Koncept filtracije

Kondenzator akumulira naelektrisanje u rastućem delu poluperiode i prazni se u opadajućem delu poluperiode; napon na izlazu je ravnomeran sa pulzirajućom komponentom čiji intenzitet zavisi od kapaciteta kondenzatora; kapacitet od nekoliko hiljada uF je u većini slučajeva zadovoljavajući.



Filtracija pulzirajuće struje

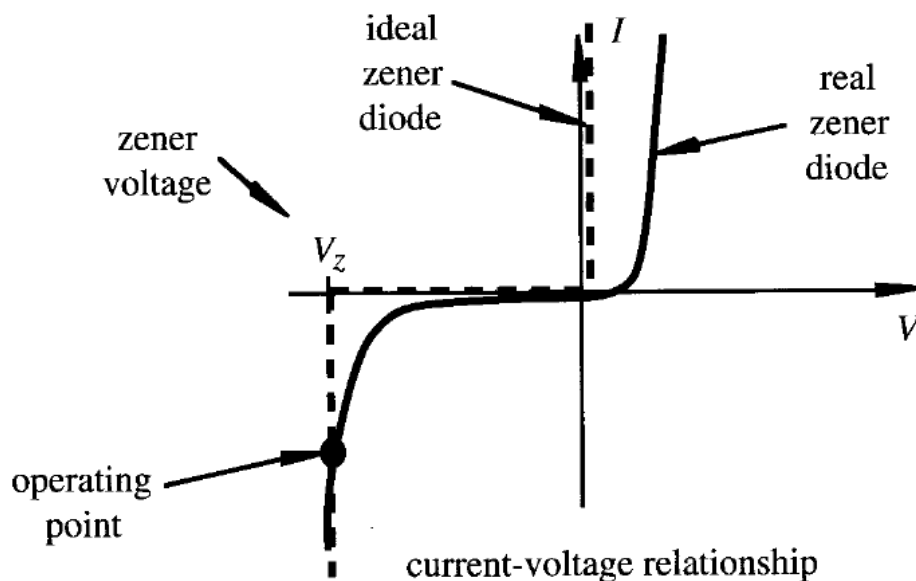
Paralelnim priključivanjem elektrolitičkog kondenzatora na izlazu filtrira se pulzirajuća komponenta; rezultat je jednosmerni napon male neravnomernosti



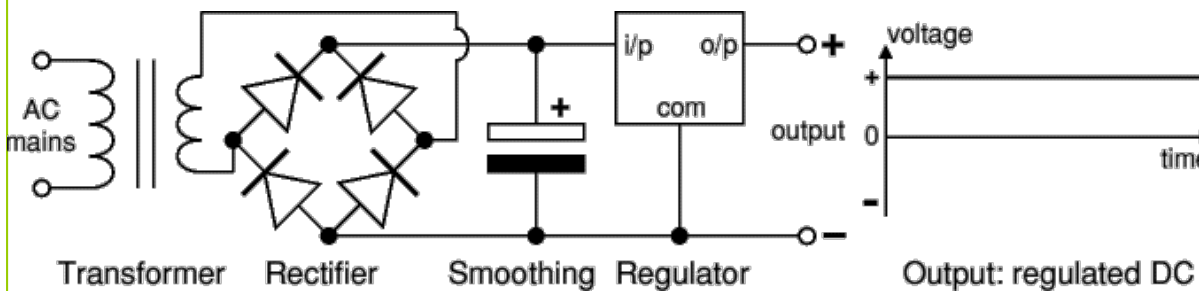
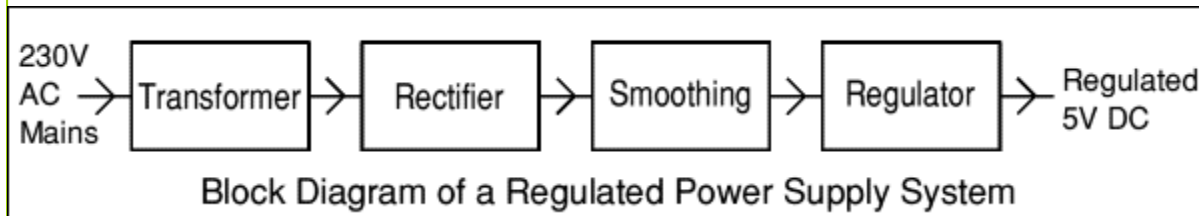
Stabilizacija izlaza

Variranje napona na izlazu ispravljača može da se eliminiše primenom diode posebne konstrukcije koja se naziva Zener dioda.

Za razliku od obične diode koja u inverznoj polarizaciji ne propušta struju sve do trenutka proboja, Zener dioda je projektovana tako da u inverznoj polarizaciji postaje provodna na određenom naponu, koji je precizno definisan; U direktnoj polarizaciji Zener dioda se ponaša kao obična dioda; Zahvaljujući ovakvim karakteristikama Zener dioda se može iskoristi u kolima za generisanje precizne naponske reference, ili za stabilizaciju izlaznog napona ispravljača.



Stabilisani ispravljač:

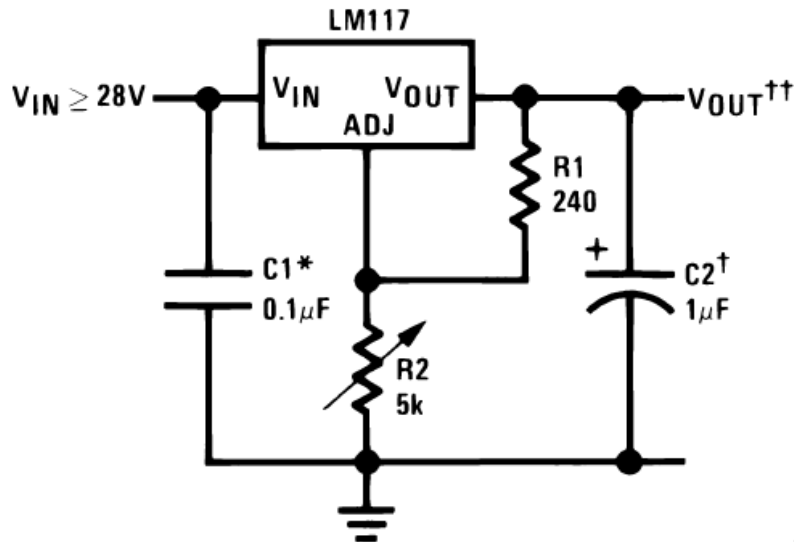


Blok dijagram

Naizmenični napon se prvo transformatorom dovodi na željenu vrednost, zatim se vrši njegovo ispravljanje, filtracija pulzirajuće komponente i na kraju stabilizacija odgovarajućim aktivnim elektronskim sklopom; Na izlazu se dobija jednosmerni napon koji je vrlo blizak naponu koji generiše baterija, bez pulzirajućih visokofrekventnih komponenti i bez variranja srednje vrednosti.

Integrirani regulator napona LM117: Primer stabilisanog ispravljača sa promenljivim izlaznim naponom i maksimalnom izlaznom strujom od 1.5 A. Regulator je opremljen zaštitom od kratkog spoja (izlazno preopterećenje) i zaštitom od termičkog preopterećenja.

1.2V–25V Adjustable Regulator



00906301

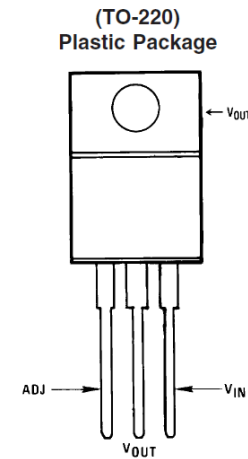
Full output current not available at high input-output voltages

*Needed if device is more than 6 inches from filter capacitors.

†Optional—improves transient response. Output capacitors in the range of 1μF to 1000μF of aluminum or tantalum electrolytic are commonly used to provide improved output impedance and rejection of transients.

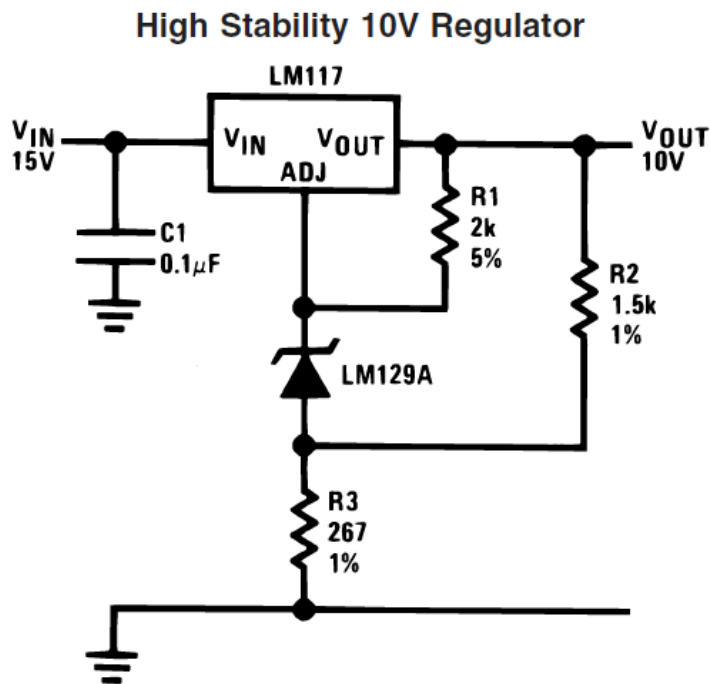
$$\dagger\dagger V_{OUT} = 1.25V \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ}(R_2)$$

Na ulaz regulatora dovodimo nestabilisan, prethodno ispravljeni i filtrirani jednosmerni napon koji može da varira u intervalu $V = (1.2, 37)$ VDC. Promenljivim otpornikom R_2 precizno regulišemo intenzitet izlaznog napona, V_{out} , koristeći dole navedenu relaciju.



U ovoj konfiguraciji LM117 regulator se koristi za generisanje precizne naponske reference (u konkretnom slučaju 10 V DC). Zener dioda u regulacionoj grani eliminiše greške vrednosti otpornika, kao i njihovu temperaturnu varijaciju (promenljivi otpornici su manje stabilni od otpornika konstantne vrednosti), čime se obezbedjuje visoka preciznost napona na izlazu.

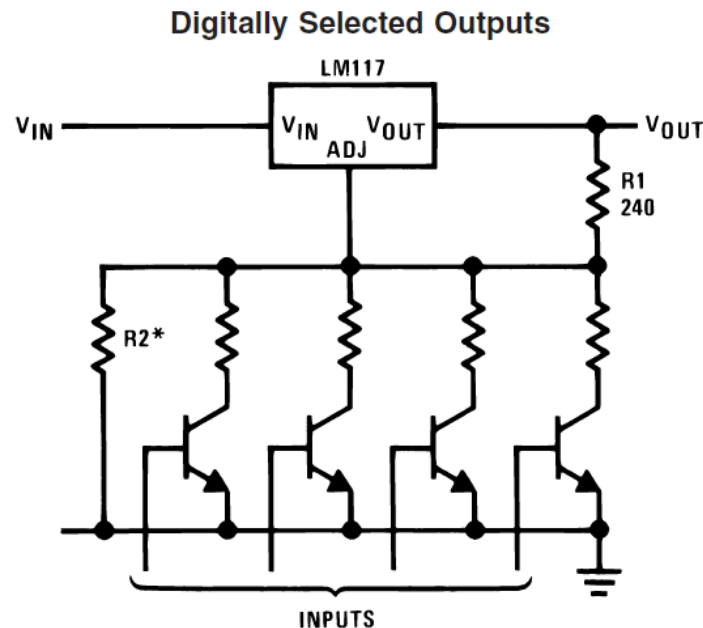
Navedeni regulator se može posmatrati i kao naponski konvertor, koji u ovom konkretnom slučaju ulazni napon od 15 V DC konvertuje u stabilisani napon od 10 V DC na izlazu sklopa.



00906311

Izborom odgovarajućeg otpornika i zener diode, moguće je napraviti vrlo precizan elektronski sklop baterijskog punjača za mobilne telefone i slične uređaje, u ovom konkretnom slučaju sa strujom punjenja od 1.5 A.

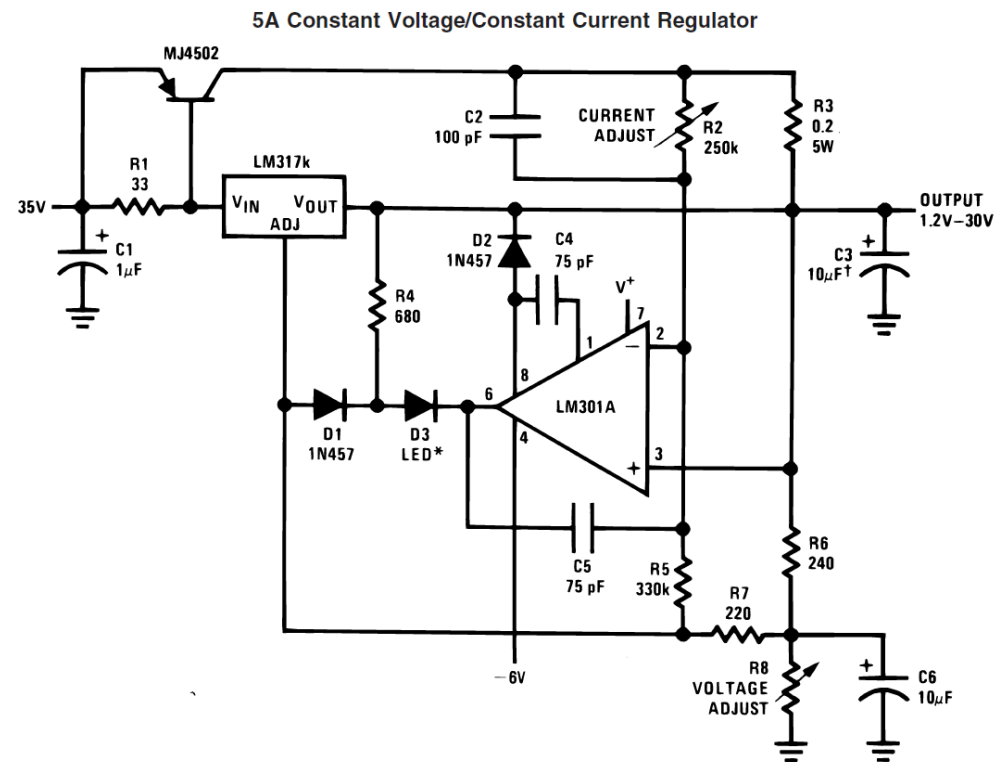
U dole navedenoj konfiguraciji LM117 regulator se koristi za automatsko generisanje niza prethodno definisanih naponskih vrednosti koje se biraju preko digitalnih ulaza koji se dovode na bazu NPN tranzistora u kolu sa zajedničkim emiterom. U zavisnosti od izabranog kanala R2 otpornik se sumira sa paralelno vezanim otpornikom u kolektorskoj grani tranzistora. Dobijena vrednost određuje napon na izlazu u skladu sa prethodno navedenom relacijom koja definiše izlazni napon. Vrednost otpornika R2 određuje najveći naponski nivo na izlazu, koji se generiše kada su svi kontrolni ulazi nepobudjeni. Treba primetiti da je dozvoljena kombinacija kontrolnih ulaza što može da generiše vrlo veliki broj naponskih vrednosti na izlazu.



00906302

*Sets maximum V_{OUT}

U ovom sklopu LM117 regulator se koristi za regulaciju napona i struje. Na ulaz se dovodi 35 V DC neregulirani napon a na izlazu se generiše regulirani napon od 1.2 do 30 V DC. Regulacija izlaznog napona ostvaruje se promenljivim otpornikom R8. Pored regulacije napona, reguliše se i struja, čija je vrednost nezavisna od opterećenja na izlazu (potrošač). Regulacija se ostvaruje otpornikom R2. Paralelno vezan tranzistor MJ4502 radi u kolu sa zajedničkom bazom, dakle ima jedinično naponsko pojačanje, a njegova funkcija je da obezbedi dodatni strujni kapacitet na izlazu regulisanog sklopa.



†Solid tantalum

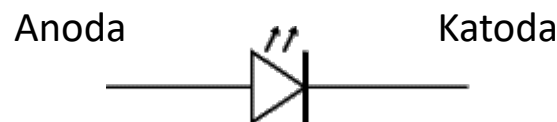
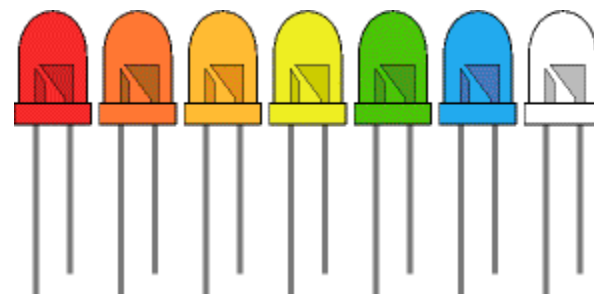
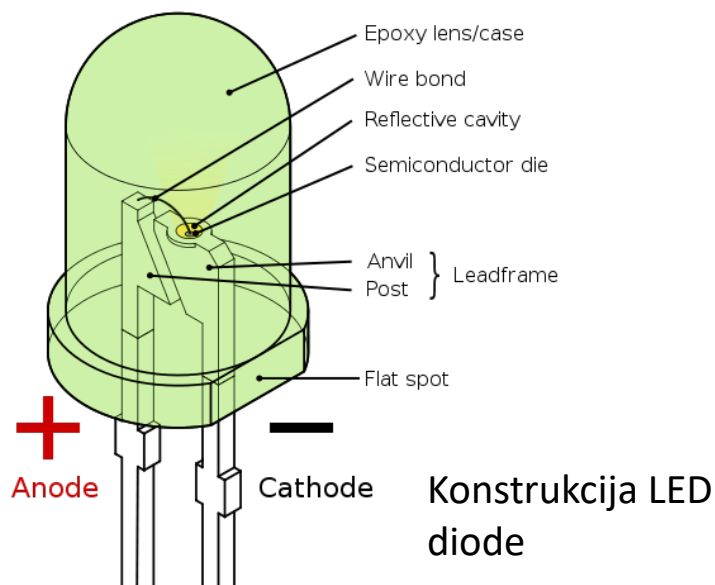
*Lights in constant current mode

00906315

Optoelektroničke diode

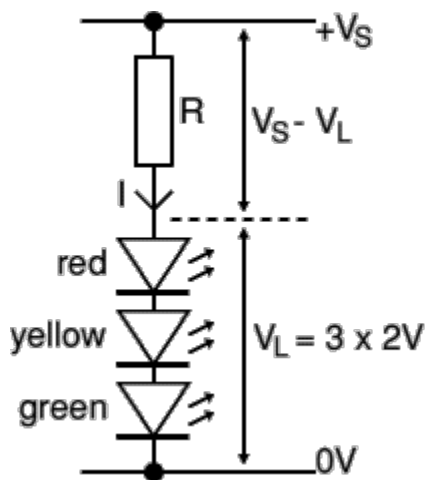
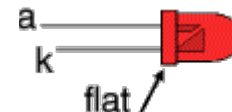
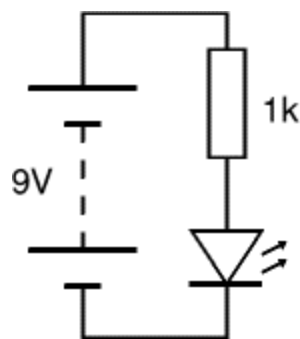
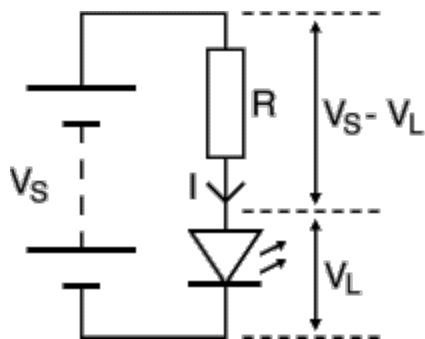
Poluprovodnici su generalno osetljivi na svetlost i mogu da emituju fotone – fotolektrični efekat. Ova svojstva se koriste kod dioda za gradnju tri specijalna slučaja optoelektričnih poluprovodničkih elemenata: 1) LED dioda (*Light Emitting Diode*), 2) Foto dioda i 3) Poluprovodnička laserska dioda.

LED diode imaju široku primenu u HMI sklopovima, ali i u specijalnim sklopovima koji se koriste za galvansku izolaciju, koja je vrlo značajna za povezivanje mikroprocesorskih sistema sa okruženjem. LED diode se odlikuju velikim stepenom iskorišćenja i vrlo brzim radom, što ih čini gotovo idealnim optičkim izvorom za mnoge aplikacije.



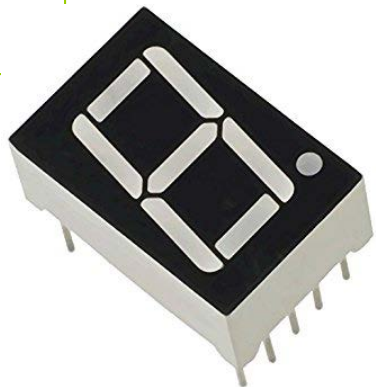
Električni simbol LED diode

Primer tipičnog kola za napajanje LED diode. Vrednost otpora R se proračunava tako da napon V_L ne predje dozvoljenu vrednost. LED dioda emituje svetlost kada je direktno polarizovana. U slučaju inverzne polarizacije LED dioda ne provodi struju i ne emituje svetlost.



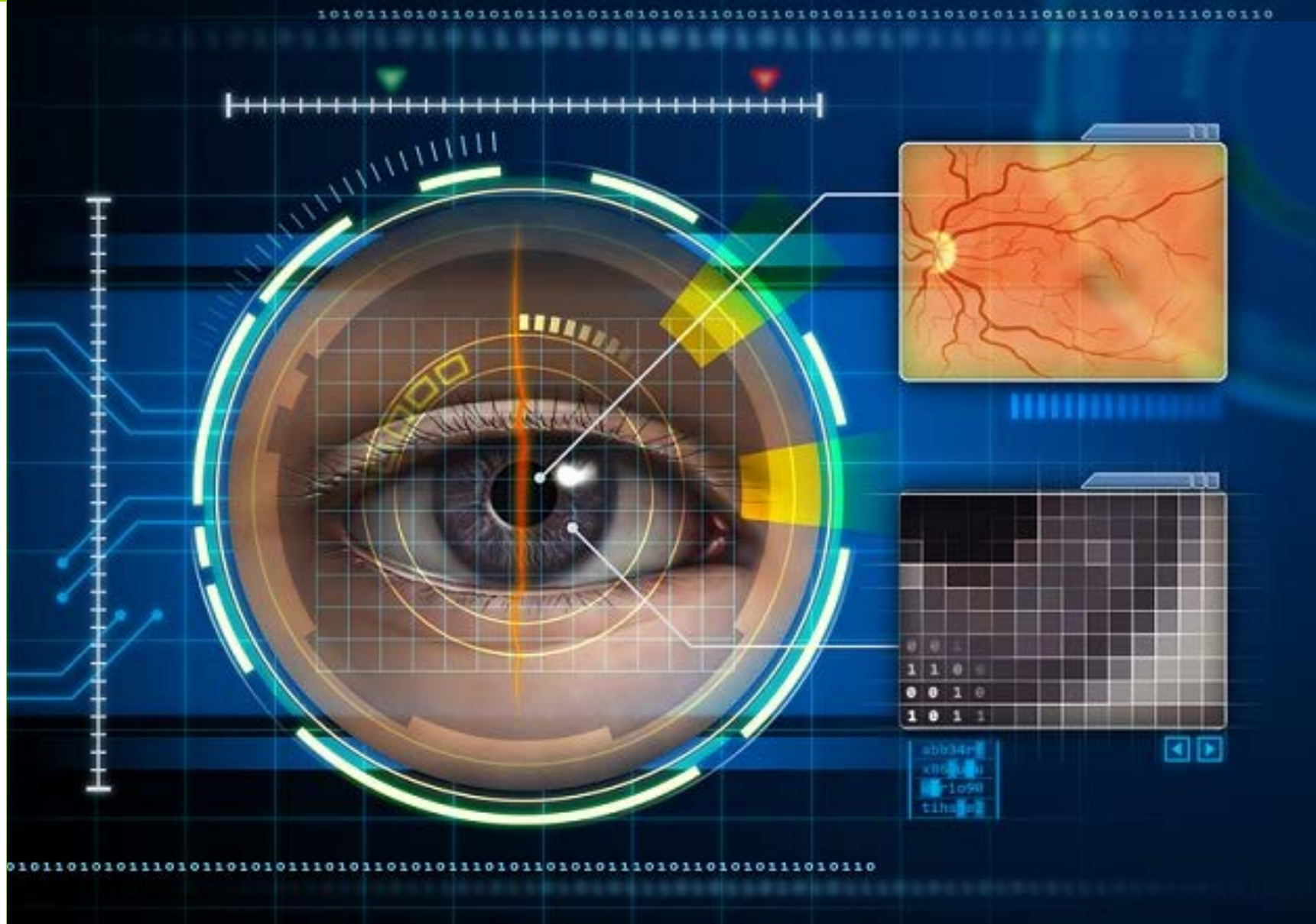
Primer serijske veze LED dioda.

Zadatak: pokaži kako da se primenom LED diode signalizira stanje ispravljača (radi / ne radi i slicno).





SISTEMI VEŠTAČKOG GLEDANJA



SISTEMI ROBOTSKOG VEŠTAČKOG GLEDANJA





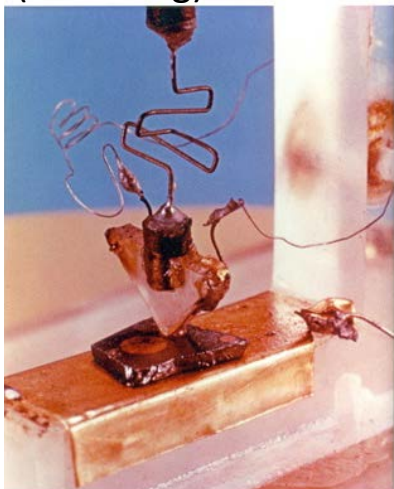
SISTEMI ROBOTSKOG VEŠTAČKOG GLEDANJA I VIRTUELNA REALNOST

Tranzistor

Pronalazak tranzistora je označio tihi početak nove ere u razvoju elektronike a i ljudske zajednice, uopšte. Može se bez preterivanja konstatovati da je pronalazak tog majušnog elementa u korenu izmenio našu civilizaciju, stvarajući uslove za razvoj kompjutera, informacionih i komunikacionih tehnologija, globalnih radio i TV komunikacija, digitalnih upravljačkih sistema, CNC mašina alatki, industrijskih robota i industrijske automatizacije najširih razmera. Tranzistor je 'parna mašina' dvadesetog veka!

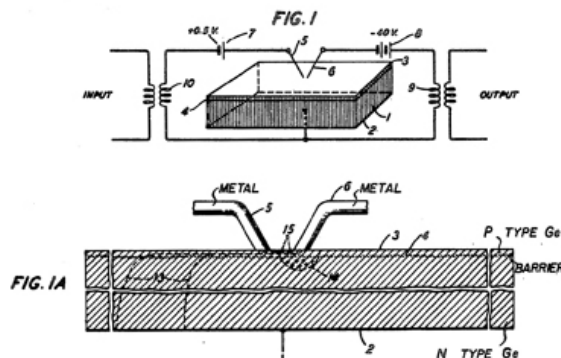
Istorija nastanka tranzistora je malo zamršena. Prvi patent povezan sa poluprovodničkim triodnim sklopom vezuje se za 1925. godinu, Kanadu i fizičara sa imenom Julius Edgar Lilienfield, austrijsko-madjarskog porekla. Lilienfield nije publikovao svoja istraživanja i ona su pala u zaborav. Zatim je nemački fizičar Oskar Heil patentirao poluprovodničku triodu 1934. godine. U oba slučaja su to bili sklopovi kakve danas poznajemo kao tranzistore sa efektom polja. Ono što danas nazivamo tranzistorom, kao i samo ime tranzistor, vezuje se za Bell Laboratories, USA, gde su 1947. godine istraživači John Barden, William Shockley i Walter Brattain razvili triodni sklop, a zatim i patentirali 1950. godine. Ovaj patent je došao u vreme koje je bilo pogodno za njegovu komercijalizaciju, čime je započela era poluprovodničke tehnologije u elektronici.

Laboratorijska verzija prvog (tačkastog) tranzistora



Patentni spis kojim je zaštićen pronalazak tranzistora

Oct. 3, 1950
J. BARDEEN ET AL
THREE-ELECTRODE CIRCUIT ELEMENT UTILIZING SEMICONDUCTIVE MATERIALS
2,524,035
Filed June 17, 1948
3 Sheets-Sheet 1



Prvi komercijalni tranzistor



Bipolarni tranzistor

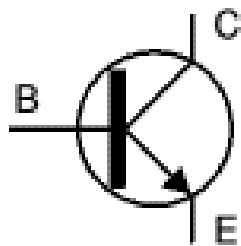
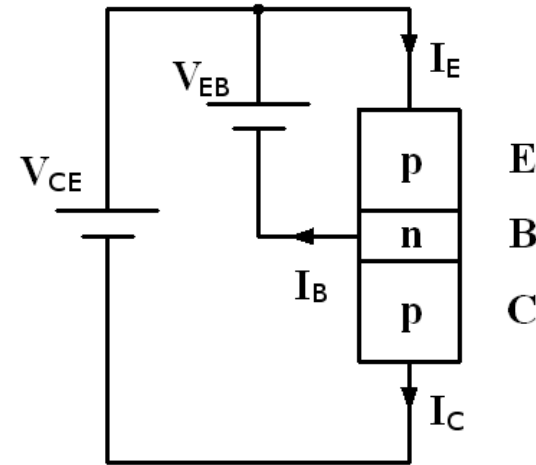
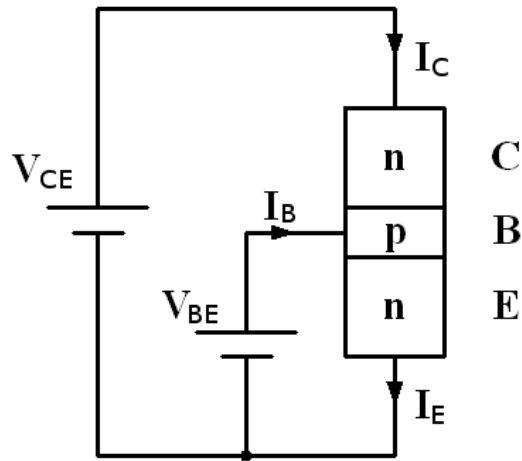
Tranzistor je aktivna poluprovodnička komponenta koja se sastoji iz kombinacije 3 dopirana sloja poluprovodnika P i N tipa. Za svaki od ova tri sloja vezuje se po jedna metalna elektroda, koje se nazivaju **baza, emiter i kolektor**.

Emiter generiše nosioce naelektrisanja (slobodne elektrone ili šupljine), kolektor prikuplja/privlači/sabira nosioce naelektrisanja, a **baza je upravljačka elektroda**.

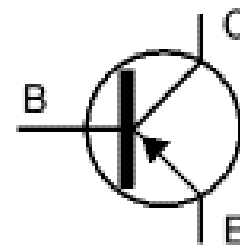
Baza je svoj naziv dobila po tome što je u prvobitnoj konstrukciji tačkastog tranzistora taj sloj poluprovodnika bio izveden kao veliki kristal germanijuma na koji su priključeni emitor i kolektor. Taj kristal je služio kao mehanička baza sklopa prvobitnog tranzistora i odatle potiče naziv za ovu elektrodu koji se do danas zadržao. Sloj poluprovodnika koji ima funkciju baze, vrlo je tanak kod savremenih tranzistora i ima debljinu od samo par mikrona.

Tehnologija poluprovodnika na kojoj počiva moderna industrija elektronskih proizvoda bazirana je fundamentalnim istraživanjima i prodorima u oblasti fizike, metalurgije, mašinstva (proizvodne tehnologije) i elektronike. Sve zajedno je početkom pedesetih godina dvadesetog veka iniciralo nastajanje i brz razvoj industrije poluprovodnika. Ova industrija je imala i još uvek ima stratešku dimenziju, pre svega za odbrambene potrebe, a zatim i za ukupni ekonomski razvoj. Silikonska dolina je primer kompleksnosti i dinamike razvoja koji je iniciran početnim rezultatima istraživanja u oblasti poluprovodnika. Tranzistor je bio o ostao ključna komponenta te industrije, a vremenom se od početnog koncepta tačkastog tranzistora, neprekidnim unapredjenjima koja su prevashodno ostvarivana u oblasti fizike, metalurgije i mašinstva, došlo do visokonaprednih tehnologija ekstremne minijaturizacije u obliku integrisanih kola (VLSI) i mikroelektromehaničkih sistema. Na ovim osnovama se zasniva novi talas vrlo složenih tehnoloških, ekonomskih i društvenih promena kroz treću industrijsku revoluciju u čijoj osnovi se nalazi kompjuter, a u osnovi kompjutera, tranzistor i čudesna NPN ili PNP topologija spoja poluprovodničkih kristalnih struktura N i P tipa.

Bipolarni tranzistor se izvodi u NPN ili PNP konfiguraciji. U praksi se najčešće primenjuju NPN tranzistori. Dalje objašnjenje principa funkcionisanja biće sprovedeno na tranzistoru NPN tipa.

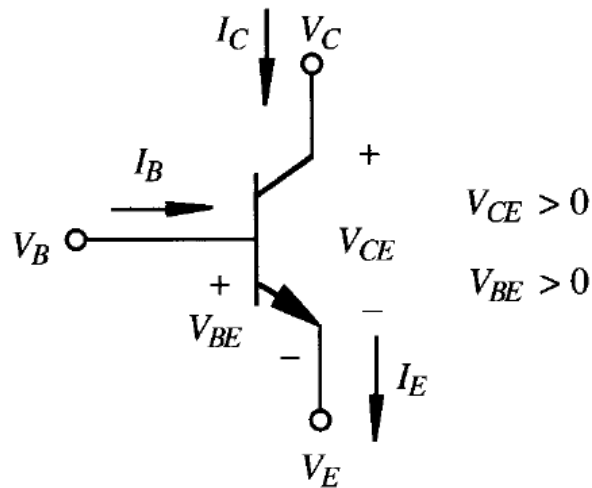


NPN



PNP

Kao što je prethodno navedeno, NPN tranzistor se sastoji iz tri poluprovodnička sloja. Mada su kolektor i emiter izvedeni iz poluprovodnika N-tipa, u emiter je procesom dopiranja ubačena veća količina donora, tako da emiter i kolektor nisu međusobno zamenljivi.

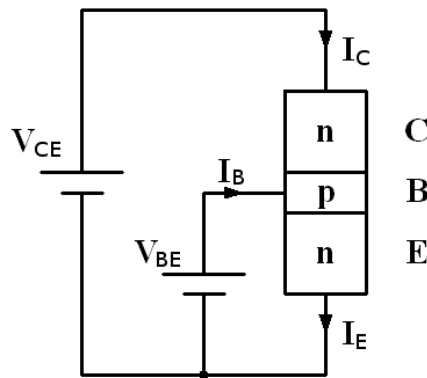


Sa V_{BE} je označen napon između baze i emitera, dok je sa V_{CE} označen napon između kolektora i emitera. Sledeće relacije definišu osnovne odnose između napona i struje na elektrodama tranzistora:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

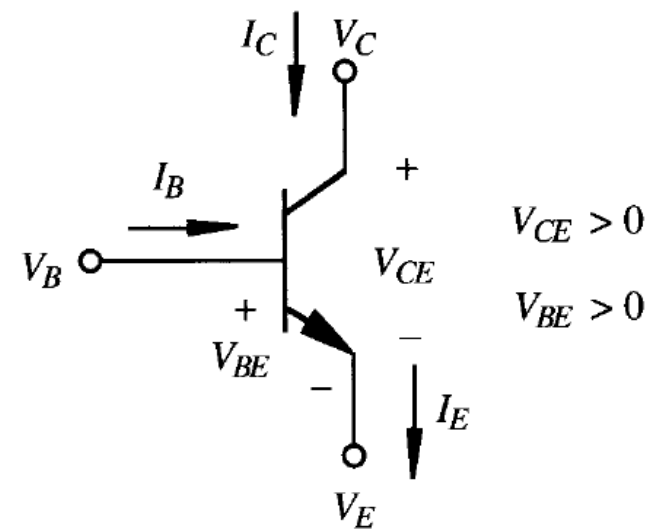
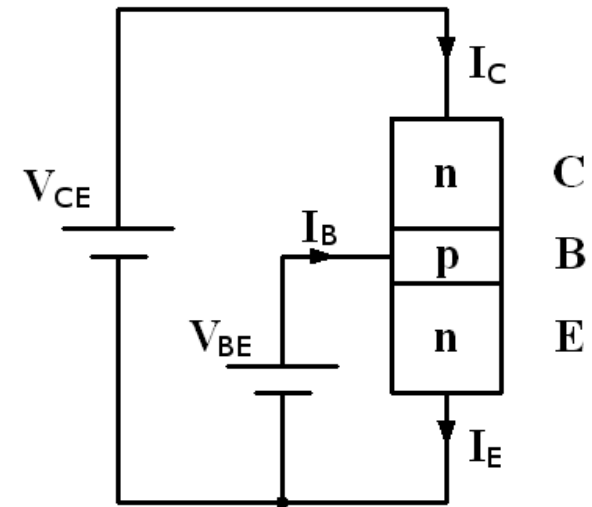


Smerovi toka struje i polarizacija elektroda prikazani su na navedenoj slici, pri čemu važi:

$$V_C > V_B > V_E$$

Iz prethodnog sledi da je **P-N spoj baza - kolektor inverzno polarisan**, dok je **P-N spoj baza -emiter direktno polarisan**.

U cilju razumevanja funkcije NPN tranzistora, prvo se polazi od P-N spoja emitera. Pošto je ovaj spoj direktno polarisan ($V_B > V_E$) slobodni elektroni se kreću iz N sloja emitera ka P sloju baze. P-N spoj kolektora je inverzno polarisan ($V_C > V_B$) u tom spoju normalno postoji sloj koji je neprovodan, kao i kod inverzno polarizovane diode. Ipak, zbog toga što je debljina P sloja baze vrlo mala, nekoliko mikrometara i zbog toga što je N sloj emitera jako dopiran, većina elektrona poseduje dovoljno energije da probije taj neprovodan sloj i predje u N sloj kolektora bez rekombinacije šupljina P sloja baze.



Pošto je smer struje suprotan od smera kretanja slobodnih elektrona, rezultat prethodno opisanog procesa je da **struja malog intenziteta I_B teče od baze ka emiteru** i da **struja velikog intenziteta I_C teče od kolektora ka emiteru**. Ova slaba struja baze ima osobinu da utiče na **intenzitet jake kolektorske struje**, pri čemu važi sledeća aproksimativna relacija:

$$I_C = \beta I_B$$

koja ukazuje da je kolektorska struja proporcionalna struji baze sa koeficijentom proporcije, u ovom slučaju, koeficijentom pojačanja β . Proizvodjači uvek označavaju ovaj koeficijent proporcije sa h_{FE} , a njegova tipična vrednost je oko 100, mada može znatno da varira u zavisnosti od vrste tranzistora. Faktor pojačanja je jako zavisn od temperature i radnog napona.

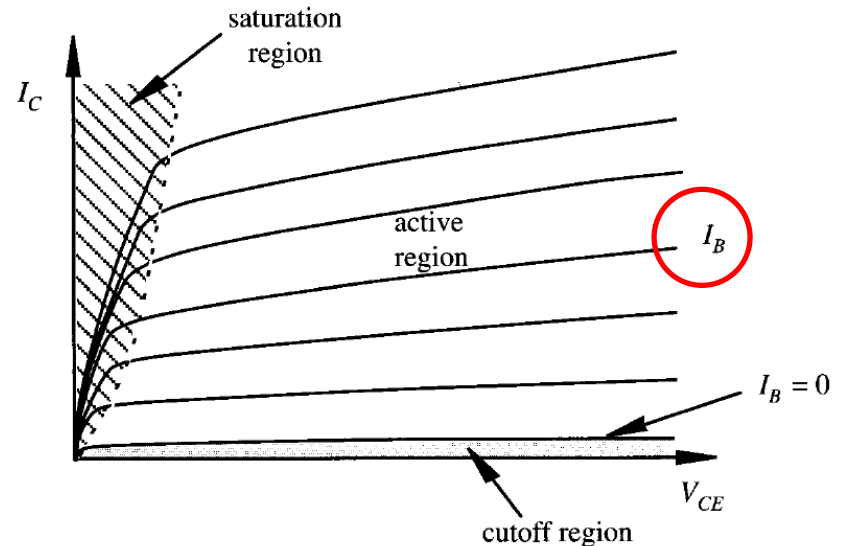
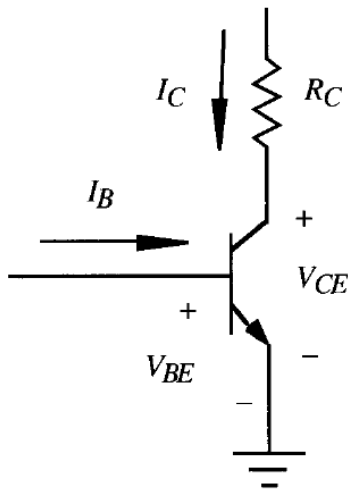
Na osnovu prethodnog sledi da se tranzistor može da iskoristi kao pojačivač slabih signala koje generišu različiti pretvarači, ali i kao digitalni prekidač koji slabim pobudnim impulsima prekida jake izlazne struje.

Tranzistor u kolu sa zajedničkim emiterom

Ukoliko se emiter uzemlji i na bazu dovede pozitivni ulazni napon, dobija se tranzistorsko kolo sa zajedničkim emiterom. Karakteristika ovog kola najbolje se pokazuje na $V_{CE} - I_C$ dijagramu (zavisnost kolektorske struje od kolektorskog napona), a koji se može iscrtati za različite konstantne vrednosti intenziteta struje baze I_B . Tako se dobija familija krivih koja opisuje rad tranzistora u kolu sa zajedničkim emiterom.

Na navedenom dijagramu mogu se uočiti **tri oblasti**, odnosno tri režima rada tranzistora:

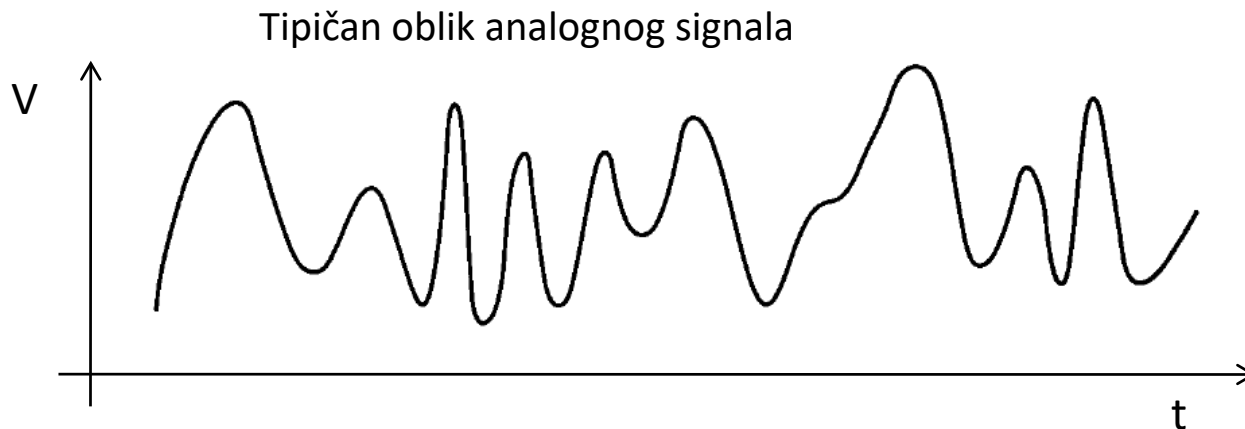
1) neprovodni režim u kome je tranzistor u neprovodnom (zakočenom) stanju – kolektorska struja I_C je jednaka nuli, **2) aktivni režim** u kome je kolektorska struja linearno proporcionalna struji baze i **3) režim zasićenja** u kojem je kolektorska struja zavisna samo od spoljašnjeg otpora kolektorske grane R_C (tranzistor se praktično nalazi u kratkom spoju), podrazumevajući postojanje struje baze I_B dovoljnog intenziteta.



Kada se tranzistor nalazi u aktivnom režimu rada onda on funkcioniše kao pojačavač analognih signala. Tranzistor u aktivnom režimu je linearan i faktor pojačanja određuje odnos izlaznog napona u kolektorskom kolu, V_{CE} , i ulaznog napona V_{BE} u kolu baze.

Sa aspekta mehatronike, rad tranzistora u aktivnom režimu značajan je pre svega za rad senzorskih sistema, koji u svom pretvaračkom bloku generišu vrlo male naponske signale, reda veličine milivolta, a često i manje, koji se moraju pojačati da bi se doveli na naponski nivo upotrebljiv za upravljački mikroprocesorski sistem. Ovakve naponske signale nazivamo analognim. Oni su kontinualni i vremenski promenljivi. Rad sa analognim signalima predmet je istraživanja i razvoja posebne oblasti elektrotehnike koja se naziva analogna elektronika.

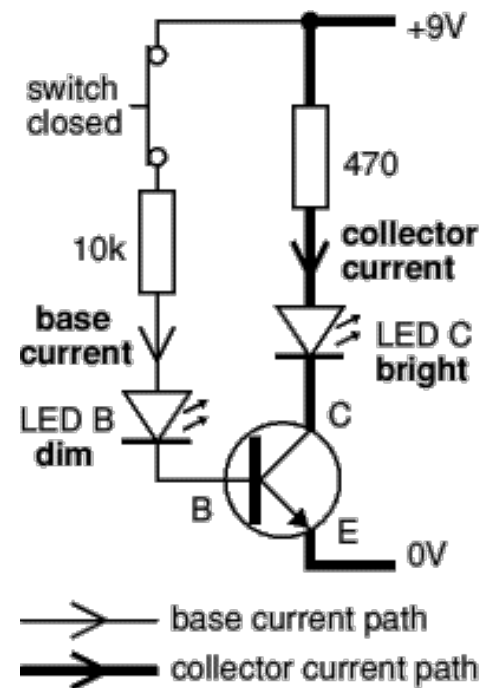
Savremena analogna elektronika bazirana je na primeni operacionih pojačivača, koji su osnovni gradivni blokovi velike funkcionalne fleksibilnosti, izvedeni kao integrisani sklopovi sa velikim brojem tranzistora i ostalih pasivnih elemenata. Operacioni pojačivači se razmatraju u posebnom nastavnom bloku.



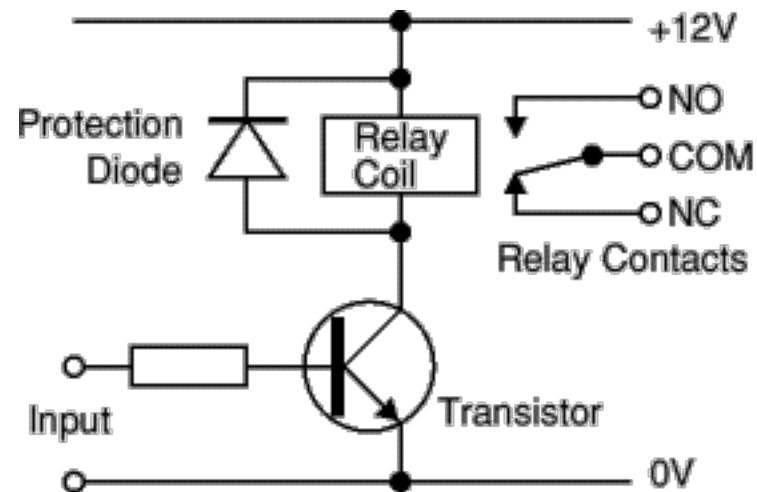
Pored primene u radu sa analognim signalima, tranzistor se može efikasno primeniti i u radu sa diskretnim signalima. Tada tranzistor radi kao prekidač.

U prekidačkom režimu rada, tranzistor može da se nadje u dva ekstremna stanja. U neprovodnom režimu izlazni napon je jednak V_{CE} , a u režimu saturacije napon se kod silicijumskih tranzistora spušta na 0.2 V, praktično na naponski nivo negativne polarizacije sklopa. Prekidačko kolo koje ilustruje ovakvu funkciju tranzistora prikazano je na narednoj slici.

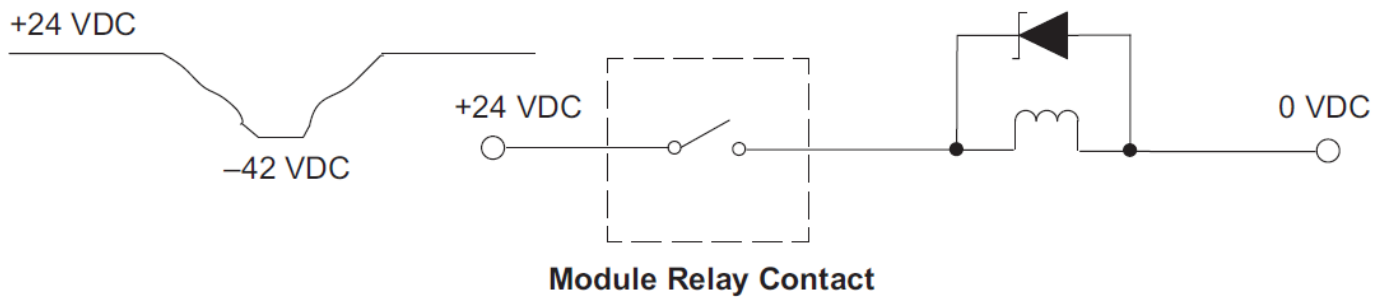
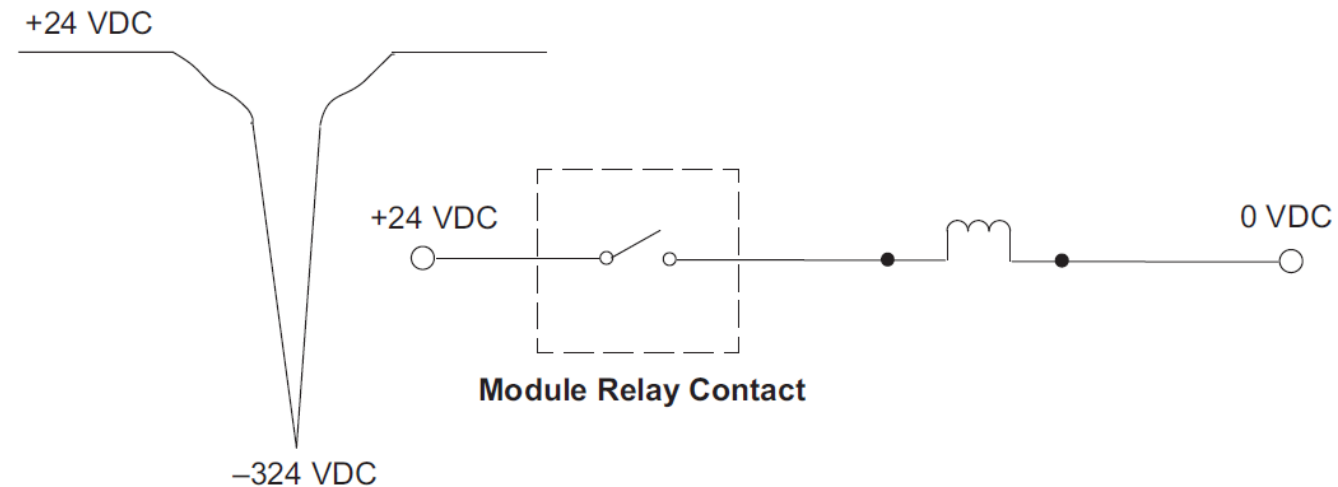
Kada se aktivira prekidač u kolu baze, slaba struja protiče kroz LED B koja počinje blago da svetli, dok istovremeno LED C u kolu kolektora počne da svetli velikim intenzitetom, što ukazuje da je struja koja kroz nju protiče velikog intenziteta. Ukoliko bi se umesto otpornika od 10 kOhm ugradio promenljivi otpornik, onda bi variranjem ovog otpora došlo do proporcionalne promene kolektorske struje što bi se manifestovalo kroz promenu intenziteta kojim svetli LED C dioda. Naravno ovo važi samo ukoliko se tranzistor nadje u aktivnom režimu rada, u suprotnom on bi se ponašao kao prekidač, pa bi LED C imala svoja dva binarna stanja, svetli/ne svetli.



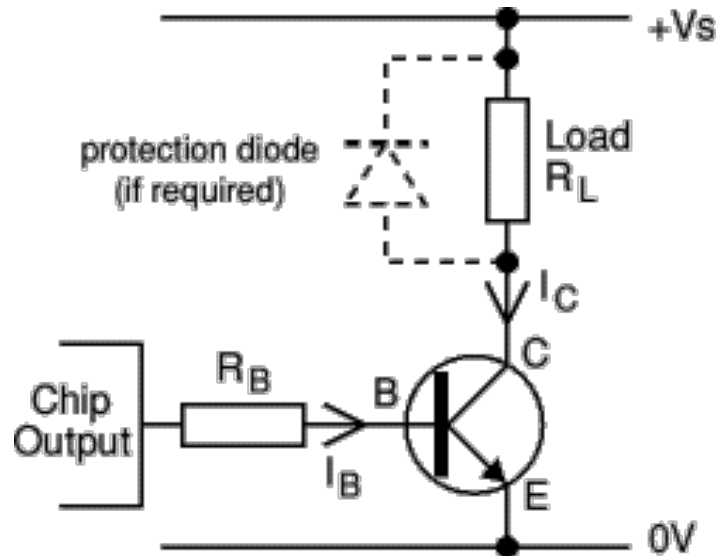
Na osnovu prethodno opisanog, tranzistorskog kola sa zajedničkim emiterom može se izvesti upravljačko digitalno kolo koje aktira elektromagnetni relej. Kada je tranzistor u neprovodnom stanju naponski potencijal na krajevima solenoida je izjednačen, tako da on ne generiše magnetno polje i ne privlači kotvu koja aktira prekidački sklop releja. U konkretnom slučaju u spoju će biti kontakti COM/NC, dok će u otvorenom stanju ostati kontakt NO. Kada se na ulaz tranzistora dovede upravljački signal, tranzistor će preći u stanje zasićenja, što će za posledicu imati razliku u naponskom potencijalu na kontaktima solenoida releja, tako da će on generisati magnetno polje, koje će privući kotvu i uspostaviti novo kontaktno stanje: spoj izmedju COM/NO i raskinuta veza izmedju COM/NC. Da bi se sprečilo preopterećenje kolektorske grane tranzistora usled indukovane kontraelektromotorne sile na namotaju solenoida releja kada se on isključuje (rizik od naponskog proboja zbog prevelikog kolektorskog napona V_{CE}), paralelno tom namotaju priključena je jedna dioda koja kratko spaja namotaje solenoida i usmerena kako je prikazano (prenaponska zaštita). Ova dioda ostvaruje neku vrstu kratkog spoja i time izoluje namotaj releja od ostatka kola.



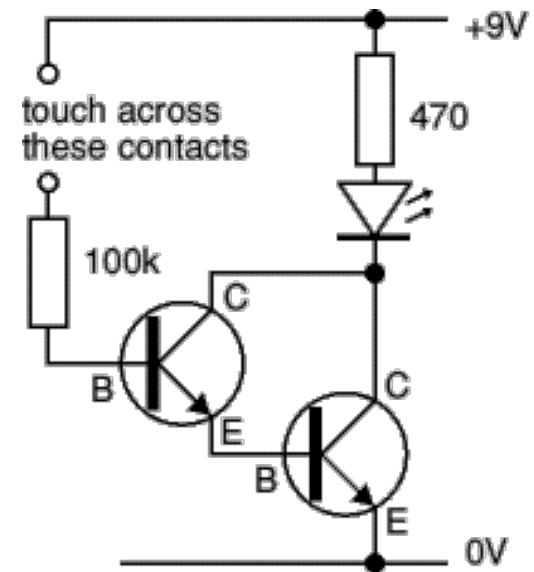
Funkcija diode za prenaponsku zaštitu kod izlaza opterećenih induktivnim potrošačem.



Tranzistor u kolu sa zajedničkim emiterom se može upotrebiti za aktuiranje izlaza mehatronskog sistema u kome se upravljačka funkcija ostvaruje pomoću mikrokontrolera. Upravljački signal koji generiše mikrokontroler na svojim izlaznim portovima pojačava se bipolarnim tranzistorom, čime se omogućava aktuiranje izlaza koji zahtevaju značajno veću struju od one koju mikrokontroler može da generiše.



Ukoliko se jednim tranzistorom (u jednom stepenu) ne može da generiše potrebna snaga (ili pojačanje), onda se koriste višestepene sprege. Na primer, dva tranzistora mogu kaskadno da se spregnu u konfiguraciju koji se naziva Darlington spoj. U ovom slučaju, tranzistor na izlazu ostvaruje funkciju pojačivača snage.



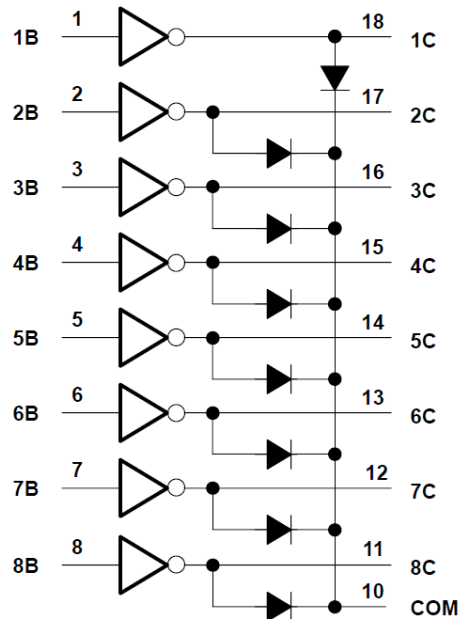
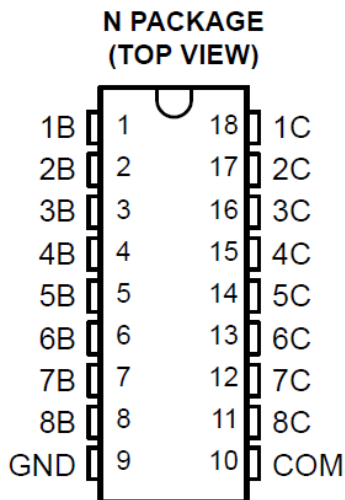
ULN2803A

DARLINGTON TRANSISTOR ARRAY

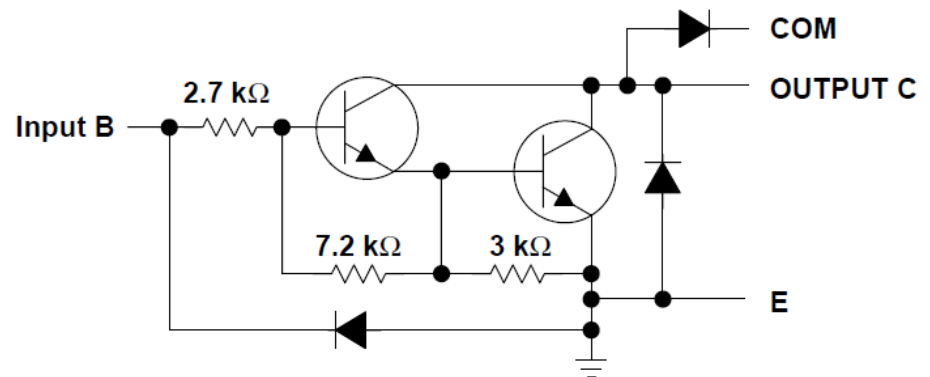
- 500 mA Rated Collector Current (Single Output)
- High-Voltage Outputs . . . 50 V
- Output Clamp Diodes
- Inputs Compatible With Various Types of Logic
- Relay Driver Applications

The ULN2803A is a monolithic high-voltage, high-current Darlington transistor array. The device consists of eight npn Darlington pairs that feature high-voltage outputs with common-cathode clamp diodes for switching inductive loads. The collector-current rating of each Darlington pair is 500 mA. The Darlington pairs may be paralleled for higher current capability.

logic diagram (positive logic)

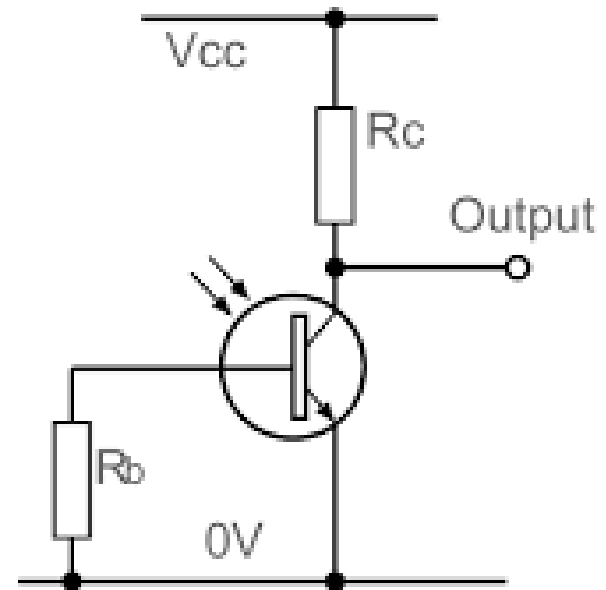
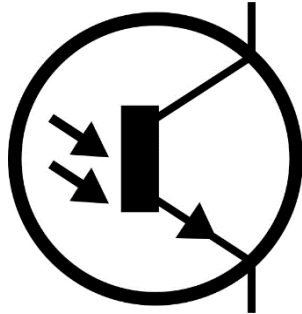


schematic (each Darlington pair)



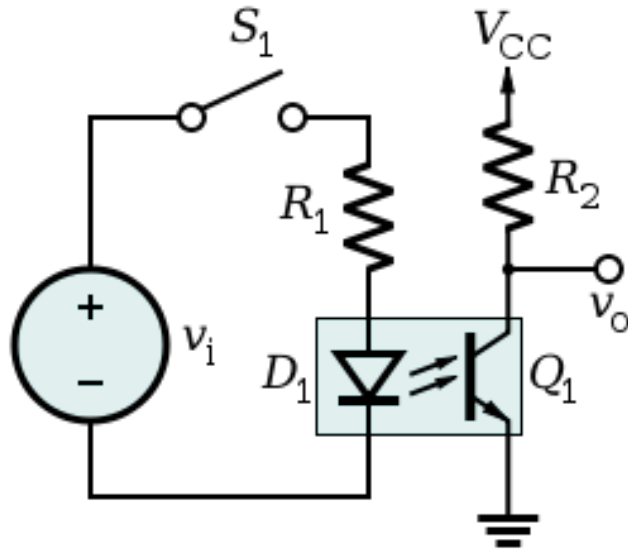
Fototranzistor

Pored električne pobude, baza bipolarnog tranzistora može da se, zahvaljujući fotoelektričnom efektu, pobudi pomoću svetlosti (u vidljivom i nevidljivom (IC) delu spektra). Tako nastaje fototranzistor.



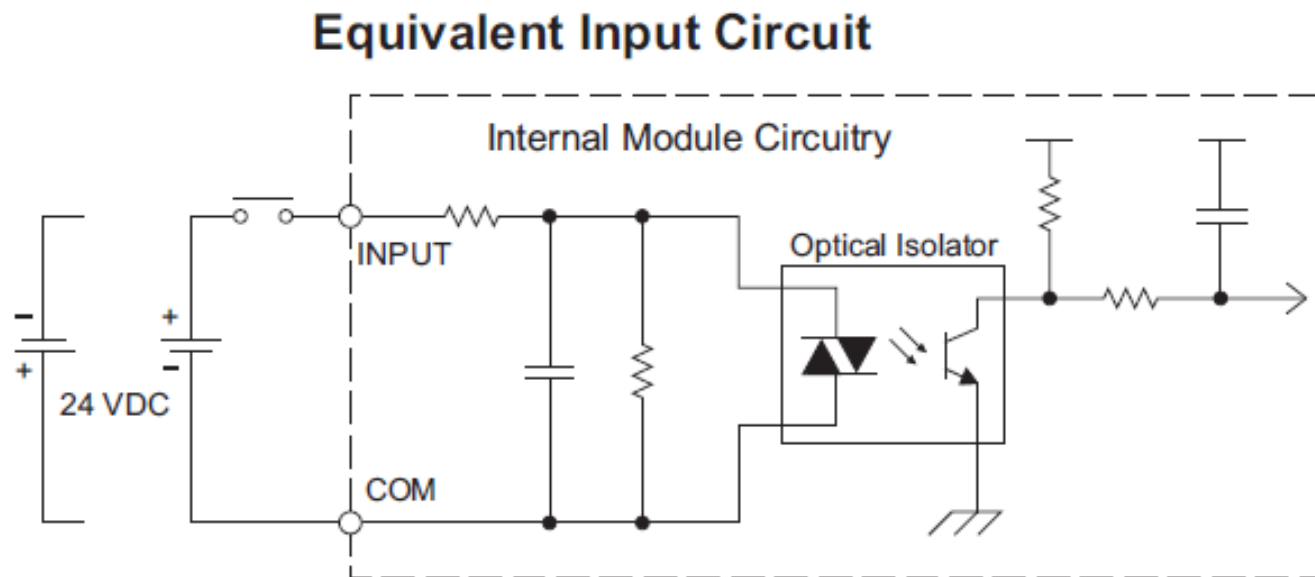
Kao i kod dioda, poluprovodnička struktura tranzistora osetljiva je na svetlost. Korišćenjem ovog efekta izgradjeni su specijalni **foto tranzistori**, koji umesto električne pobude baze, upravljačku struju dobijaju od fotoelektričnog efekta (izvor svetlosti se fokusira na bazu tranzistora). Foto tranzistor za razliku od fotodioda imaju značajno veću osetljivost, tako da mogu da reaguju na vrlo male intenzitete svetlosti u vidljivom ili nevidljivom delu spektra.

Kombinujući foto diodu i foto tranzistor dobija se jedan vrlo značajan sklop koji ima veliku primenu u gradnji mehatronskih sistema. Taj sklop se naziva optoizolator, ili mnogo češće optokapler (prema engleskom terminu *optocoupler*), a njegova funkcija je da galvanski razdvaja dva električna kola. Ovakav sklop se primenjuje za zaštitu osetljivih delova elektronskog upravljačkog ili senzorskog sistema od različitih smetnji, uključujući i naponska preopterećenja/proboje koja mogu da dovedu do njihovog razaranja. U ovom slučaju galvanska izolacija je primenljiva samo kada se radi sa digitalnim signalima.



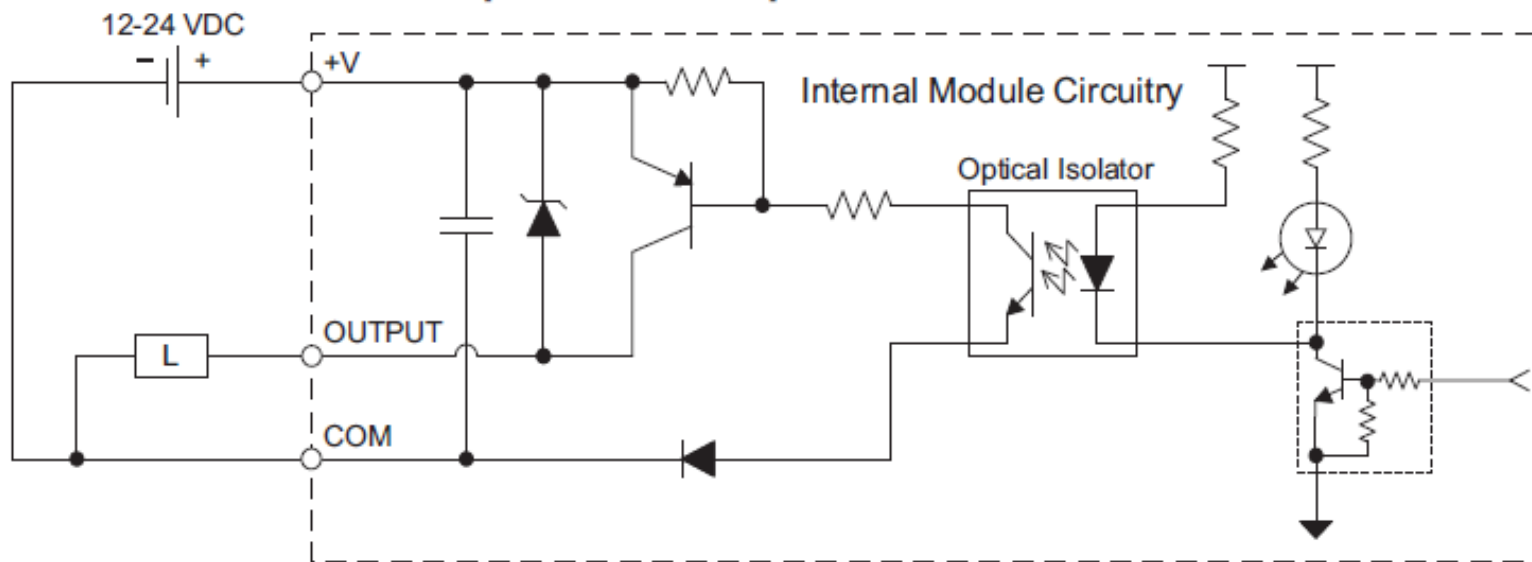
Galvanska izolacija analognih signala se ostvaruje primenom transformatora. Drugi, savremeniji način, baziran je na digitalnim sklopovima kojima se analogni signal aproksimira širinski modulisanim (PWM) digitalnim signalom.

Tipična konfiguracija ulaznog kanala programabilnog automata (PLC) sa galvanski izolovanim tranzistorskim ulazom. Ovakva konfiguracija ostavlja mogućnost slobodnog izbora zajedničkog izvoda, koji može da bude masa ili plus potencijal izvora kojim se napajaju senzori koji se priključuju na ulaz PLC. Da bi se ostvarila ova funkcija LED optoizolacioni element mora da sadrži dve LED diode u antiparalelnoj vezi (ovakav element se naziva diak).

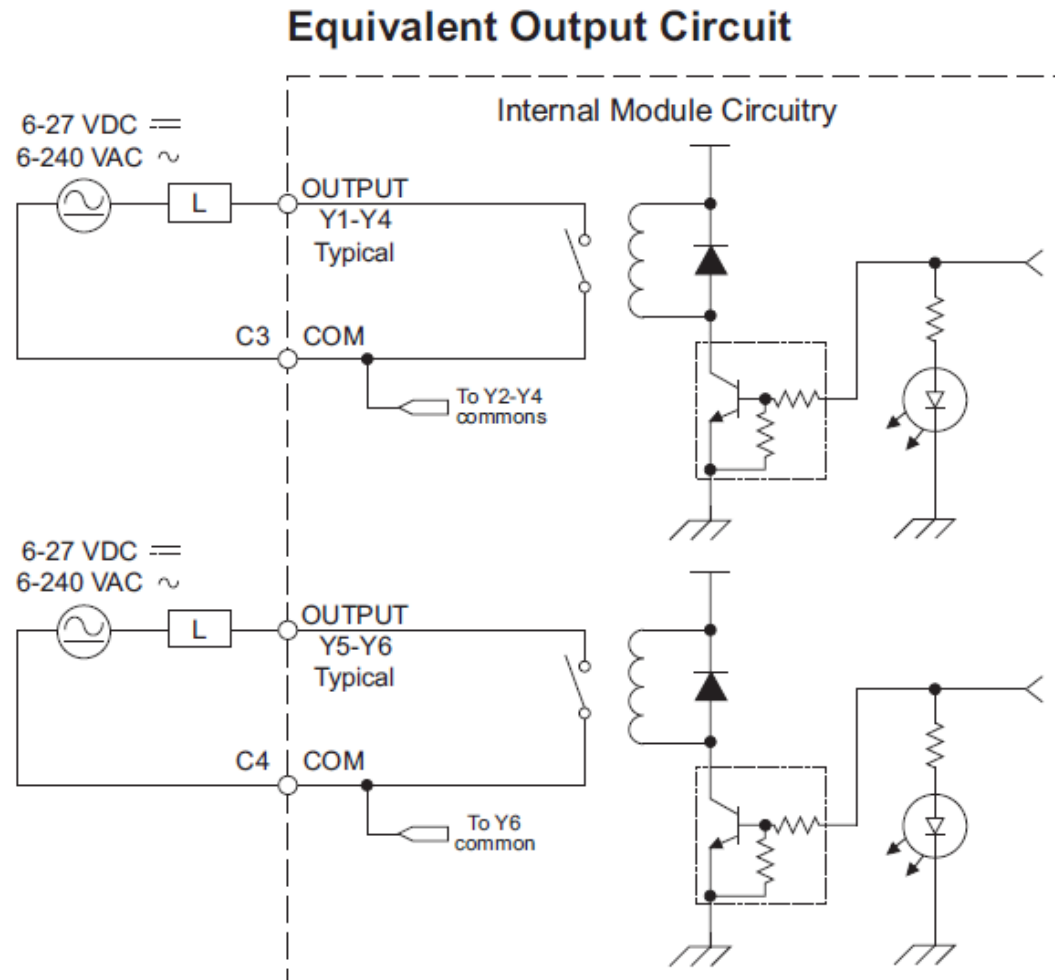


Tipična konfiguracija izlaznog kanala programabilnog automata (PLC) sa galvanski izolovanim tranzistorskim izlazom sa zajedničkom masom (u engleskoj tehničkoj literaturi se izlazi sa zajedničkom masom nazivaju *sink type output*). Ukoliko se iz nekog razloga zahteva da zajednički izvod bude pozitivnog polariteta, zajednički izvor, (*source type output*), onda se mora rekonstruisati električna šema izlaznog modula. Ovo važi samo za slučaju tranzistorskih izlaza. Kod relejnih izlaza koji su takodje galvanski izolovani, ovo ograničenje ne važi jer se polaritet kontakata releja proizvoljno bira.

Equivalent Output Circuit

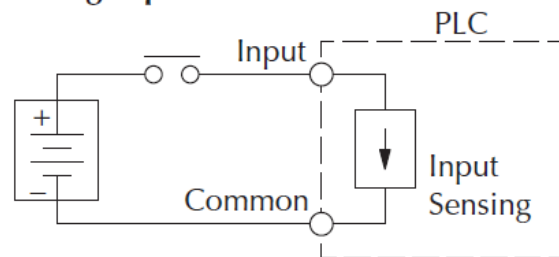


Primer relejnog digitalnog izlaza:

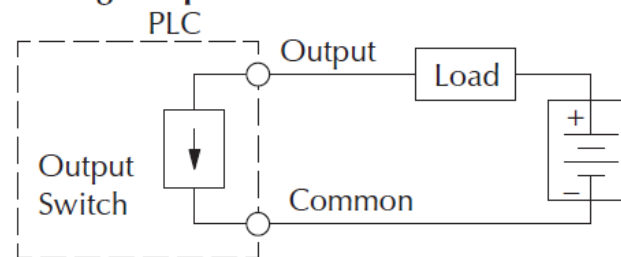


Funkciju ulaznog ili izlaznog kanala nekog digitalnog upravljačkog uređaja možemo shvati kao funkciju prekidača. U tom slučaju kod ulaza ili izlaza sa zajedničkom masom taj ‘ekvivalentni prekidač’ obezbedjuje put ka masi jednosmernog izvora napajanja, dok u slučaju ulaza ili izlaza sa zajedničkim izvorom, ‘ekvivalentni prekidač’ obezbedjuje put ka pozitivnom polu jednosmernog izvora napajanja.

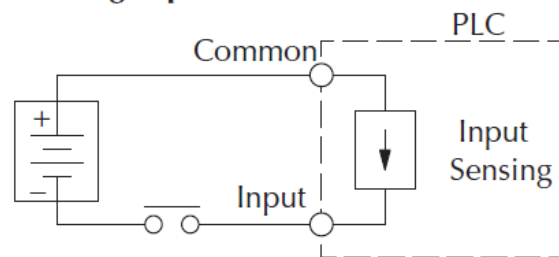
Sinking Input



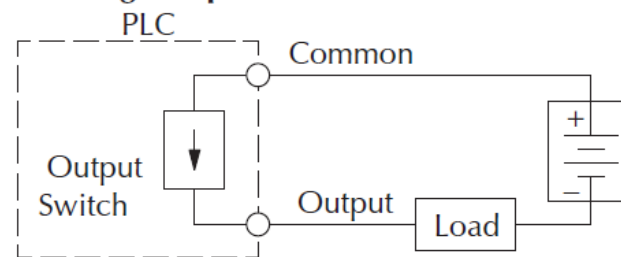
Sinking Output



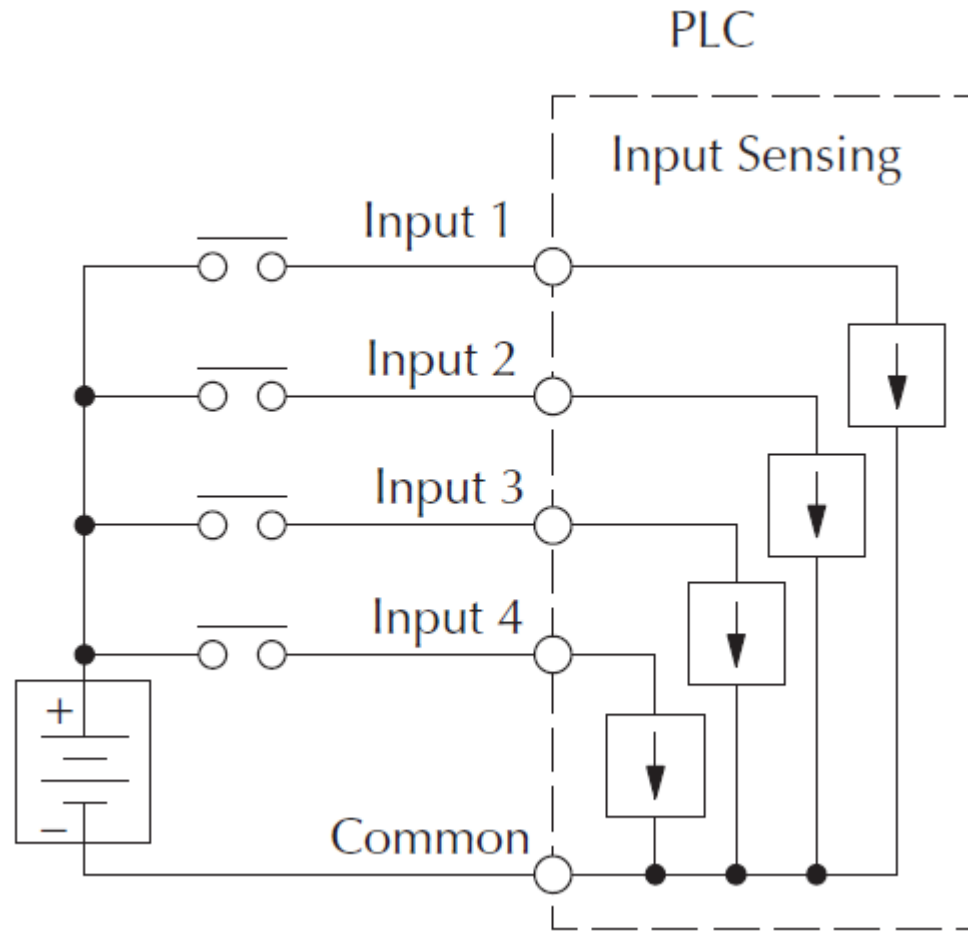
Sourcing Input



Sourcing Output

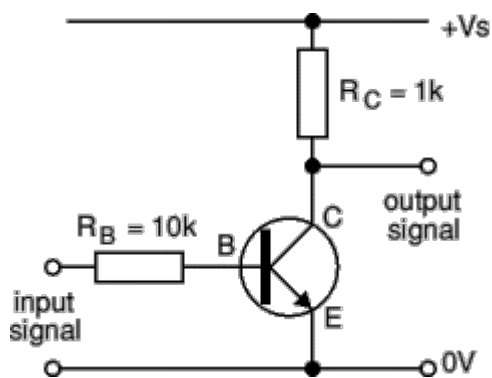


Koncept zajedničkog (common) voda kod ulaznih (prikazano na slici ispod) i izlaznih kanala digitalnog upravljačkog sistema.

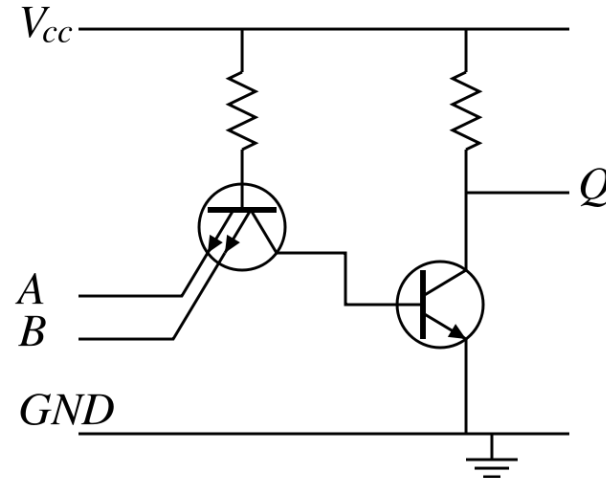


Tranzistor kao logički element

Tranzistor u kolu sa zajedničkim emiterom se može iskoristiti kao logički invertor, odnosno kao sklop koji na svom izlazu generiše naponski komplement ulaza. Postoje različita tehnička rešenja u gradnji logičkih sklopova koji su bazirani na tranzistorima. Razvojem tehnologije izrade poluprovodničkih sklopova evoluirala su i tehnička rešenja, uvek unapredjujući performanse u odnosu na prethodnu generaciju (veća brzina rada (približavanje idealnom logičkom elementu), manja potrošnja energije, jednostavnija i jeftinija proizvodnja, pakovanje velike gustine, ...). Razvoj tranzistorskih logičkih elemenata započeo je sa **RTL** tehnologijom (resistor-transistor logic), zatim je sledila **DTL** tehnologija (diode-transistor logic), pa zatim **TTL** tehnologija (transistor-transistor logic) koja je još uvek široko rasprostranjena i predstavlja jedan od važećih industrijskih standarda.

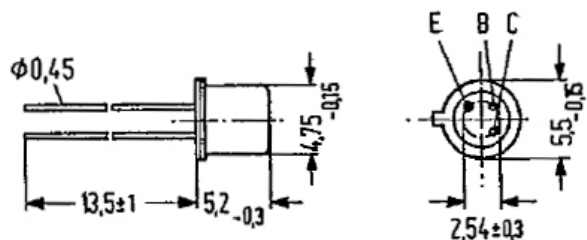


Logički element invertora – NE kolo



Logički NI element

Primer NPN tranzistora BC107, BC108 i BC109



Approx. weight 0.3 g

Dimensions in mm

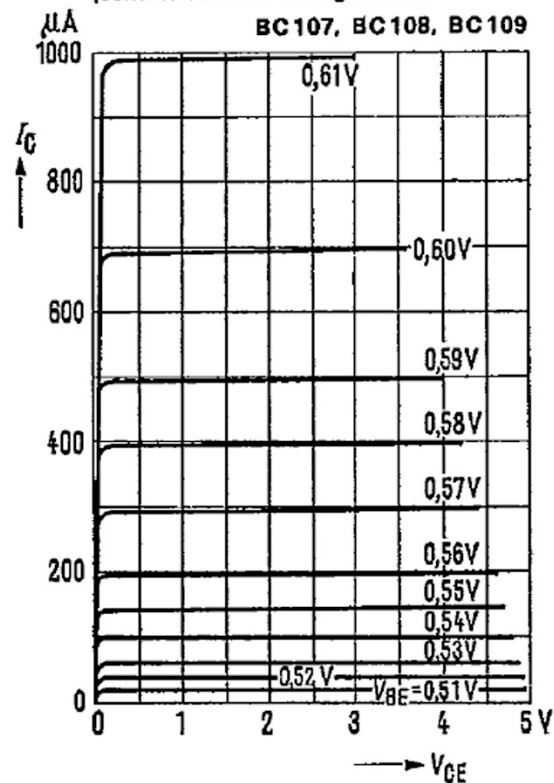
Maximum ratings		BC 107	BC 108	BC 109	
Collector-emitter voltage	V_{CES}	50	30	30	V
Collector-emitter voltage	V_{CEO}	45	20	20	V
Emitter-base voltage	V_{EBO}	6	5	5	V
Collector current	I_C	100	100	50	mA
Collector peak current	I_{CM}	200	200	—	mA
Base current	I_B	50	50	5	mA
Junction temperature	T_j	175	175	175	°C
Storage temperature range	T_{stg}		-55 to +175		°C
Total power dissipation	P_{tot}	300	300	300	mW
Thermal resistance					
Junction to ambient air	R_{thJA}	≤ 500	≤ 500	≤ 500	K/W
Junction to case	R_{thJC}	≤ 200	≤ 200	≤ 200	K/W

Static characteristics ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$). The transistors are grouped according to the DC current gain h_{FE} and marked by A, B, C. At $V_{CE} = 5\text{ V}$ and the collector currents indicated below the following static characteristics apply:

h_{FE} group	A	B	C
Type	BC 107 BC 108 -	BC 107 BC 108 BC 109	- BC 108 BC 109
I_C mA	h_{FE} I_C/I_B	h_{FE} I_C/I_B	h_{FE} I_C/I_B
0.01	90	150	270
2	170 (120 to 220)	290 (180 to 460)	500 (380 to 800)
100 ²⁾	120	200 ²⁾	400 ²⁾

I_C mA	BC 107 BC 108 BC 109			$V_{CEsat}^{1)}$ V	$V_{BEsat}^{1)}$ V
	V_{BE} V	I_C mA	I_B mA		
0.1	0.55	10	0.5	0.07 (<0.2)	0.73 (<0.83)
2	0.62 (0.55 to 0.7)				
100 ²⁾	0.83 ²⁾	100 ²⁾	5	0.2 (<0.6) ²⁾	0.87 (<1.05) ²⁾

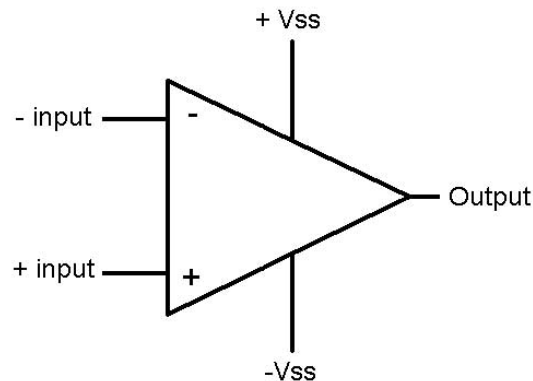
Output characteristics
 $I_C = f(V_{CE})$; $V_{BE} = \text{parameter}$
 (common emitter configuration)



Operacioni pojačivač

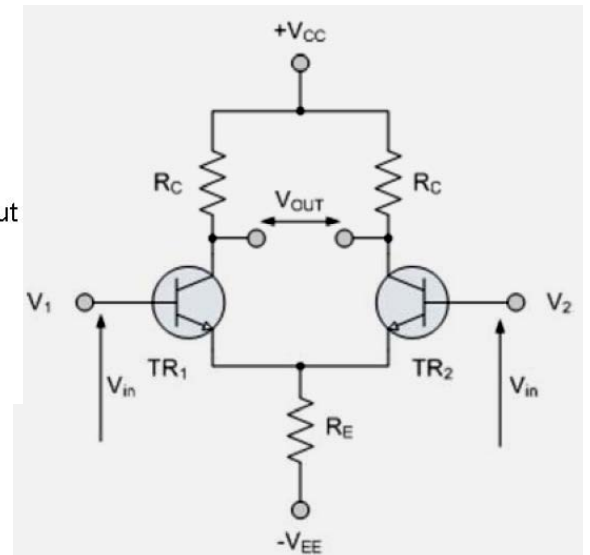
Svoje korene vodi iz analognih digitalnih kompjutera gde je korišćen kao univerzalni modul za izvodjenje različitih matematičkih operacija (odatle i naziv: *operacioni pojačivač*).

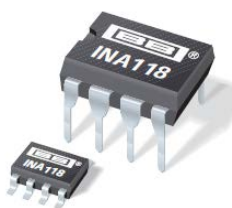
Operacioni pojačivač je aktivni sklop koji se sastoji iz niza jednostepenih pojačivača, pri čemu je prvi stepen uvek izveden kao diferencijalni pojačivač. Ukupno naponsko pojačanje ovakvog sklopa se dobija množenjem pojačanja pojedinih pojačivačkih stepena, pa je njegova vrednost vrlo velika, teoretski beskonačna. U praksi, operacioni pojačivač pojačava više stotina puta (do 10.000) razliku napona (diferencija) signala koji se dovode na njegova dva ulaza (vrlo veliki ulazni otpor). Izvodi se u obliku integrisanog kola. U zavisnosti od dopunskih komponenti ostvaruju se različite linearne i nelinearne funkcije. Ima ogromnu primenu u praksi. Posebno se izdvajaju primene za pojačanje analognih senzorskih signala (instrumentacioni pojačivači), koji zahtevaju izuzetnu linearnost i vrlo nizak nivo šuma.



Operacioni pojačivač: simbol

Sastoji se iz pet polova. Dva ulaza (invertovani i neinvertovani), jedan izlaz i dva pola za napajanje.





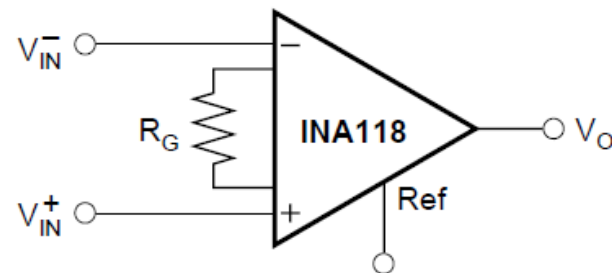
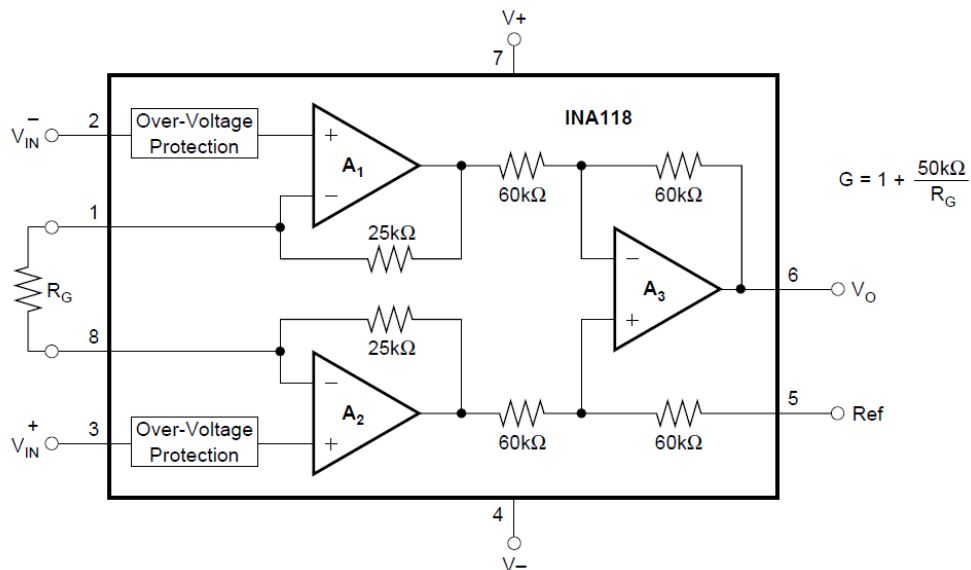
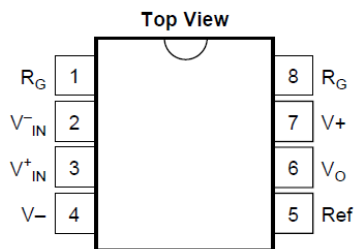
Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIER INA118

The INA118 is a low power, general purpose instrumentation amplifier offering excellent accuracy. Its versatile 3-op amp design and small size make it ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (70kHz at $G = 100$).

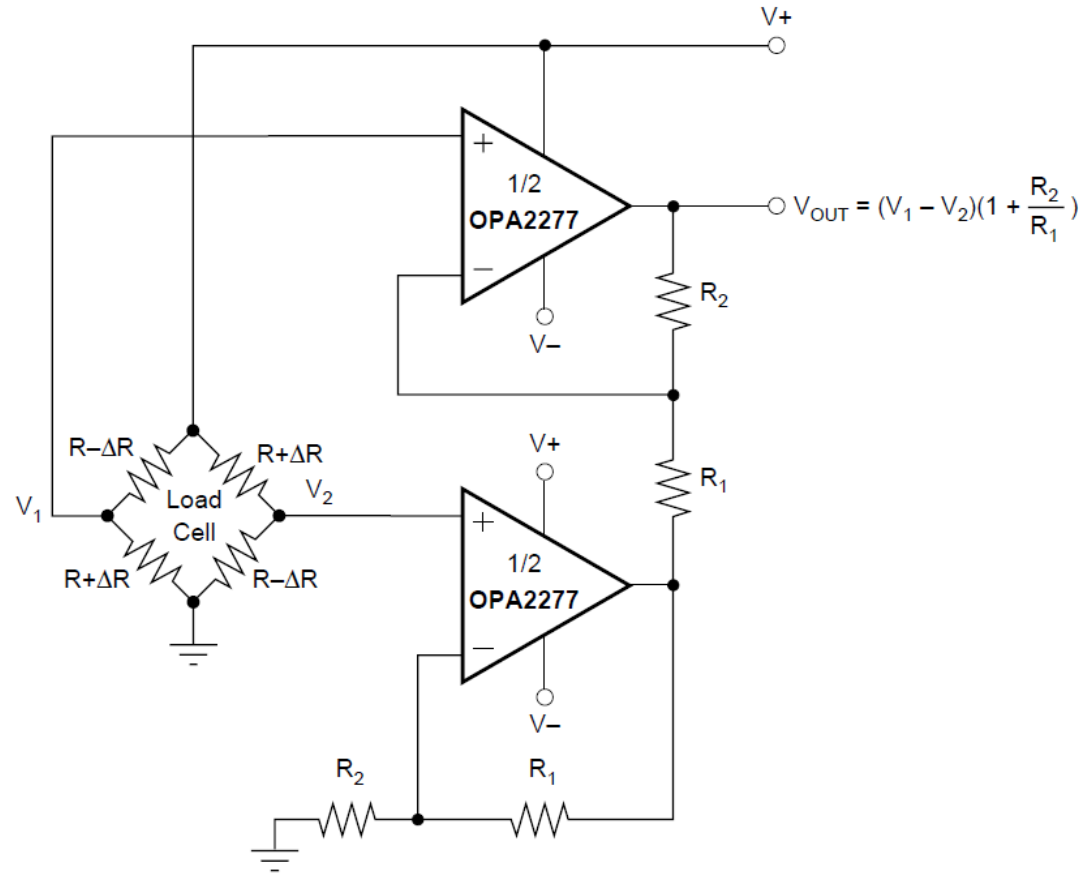
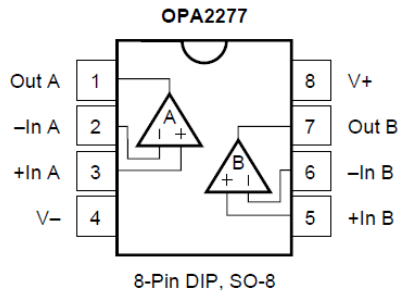
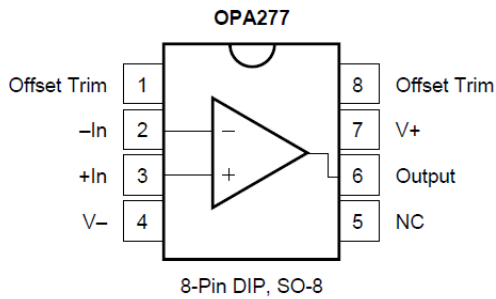
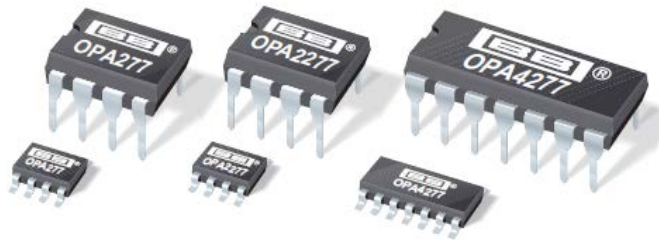
A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. Internal input protection can withstand up to $\pm 40V$ without damage.

The INA118 is laser trimmed for very low offset voltage (50mV), drift (0.5mV/°C) and high common-mode rejection (110dB at $G = 1000$). It operates with power supplies as low as $\pm 1.35V$, and quiescent current is only 350mA—ideal for battery operated systems.

The INA118 is available in 8-pin plastic DIP, and SO-8 surface-mount packages, specified for the $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ temperature range.



Burr-Brown Corporation - High Precision OPERATIONAL AMPLIFIERS: OPA277, OPA2277, OPA4277



For integrated solution see: INA126, INA2126 (dual)
INA125 (on-board reference)
INA122 (single-supply)

Unipolarni tranzistor

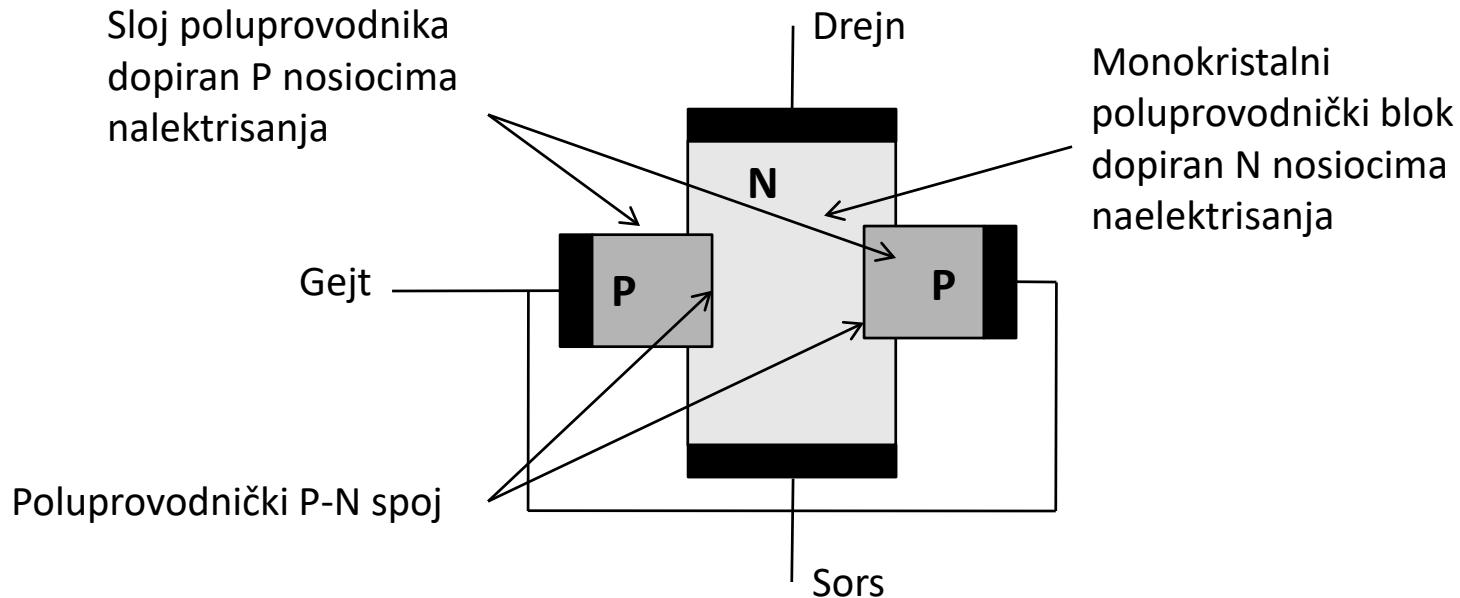
Unipolarni tranzistor je **tranzistor sa efektom polja**, odnosno FET tranzistor (*Field Effect Transistor*).

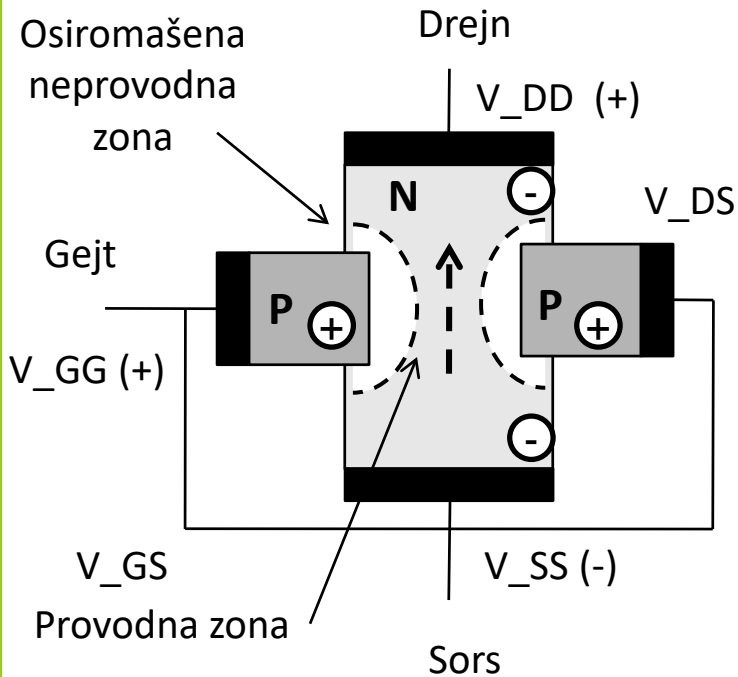
Mada kao i u slučaju bipolarnog tranzistora FET tranzistor ima tri elektrode, princip na kome se zasniva funkcija ovog tranzistora je potpuno drugačiji, a kao posledica toga, FET tranzistor poseduje određene specifične osobine koje ga čine vrlo pogodnim za gradnju mehatronskih sistema. Posebno se izdvajaju vrlo velika ulazna otpornost, brzina rada i mogućnost rada sa strujama i naponima velikog intenziteta, uz slabu zavisnost izlazne struje od izlaznog napona. U tehnološkom smislu, unipolarni tranzistor je jednostavniji i jeftiniji za proizvodnju. Navedene osobine predstavljaju njegove osnovne prednosti u odnosu na bipolarni tranzistor.

Postoji veliki broj različitih konstruktivnih oblika FET tranzistora. U okviru ovog kursa razmatraju se dve osnovne grupe: 1) spojni FET tranzistori i 2) FET tranzistori sa izolovanim gejtom. Navedene grupe FET tranzistora se izvode kao N i kao P kanal FET tranzistori.

Spojni FET tranzistor - JFET

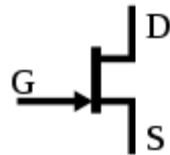
JFET (*Junction gate Field-Effect Transistor*) je najjednostavniji oblik FET tranzistora. Sastoji se iz monokristalnog poluprovodničkog bloka na čijim krajevima su izvedene dve metalne elektrode. Ove elektrode nose naziv **sors** i **drejn** elektroda i funkcionalni su ekvivalentni emiteru i kolektoru kod bipolarnog tranzistora. Treća elektroda nosi naziv **gejt** i ima upravljačku funkciju, kao što je to slučaj sa bazom kod bipolarnog tranzistora. Gejt sloj se izvodi od dopiranog poluprovodnika bogatog nosiocima naelektrisanja čiji je potencijal suprotan od potencijala monokristalnog bloka za koji se vezuju sors i drejn elektrode. Kod JFET konstruktivnog oblika, gejt elektroda ostvaruje PN spoj sa monokristalnim blokom, odakle i dolazi njegov naziv, koji se na našem jeziku može prevesti kao spojni tranzistor sa efektom polja.



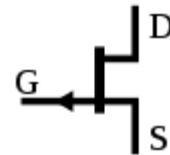


Nosioci naelektrisanja se kreću od sors elektrode (izvor) ka drejn elektrodi (u konkretnom slučaju to su slobodni elektroni). Količina nosioca naelektrisanja uslovljena je veličinom neprovodnog polja koje oko sebe formira gejt elektroda (slično efektu kod PN spoja poluprovodničke diode).

Što je veći potencijal gejt elektrode, veće je i polje njenog uticaja na monokristalni blok, čime se smanjuje površina poprečnog preseka provodnog kanala, a samim tim i količina naelektrisanja koje se prenosi sa sors na drejn elektrodu. Na ovaj način gejt elektroda reguliše izlaznu struju I_{SD} .



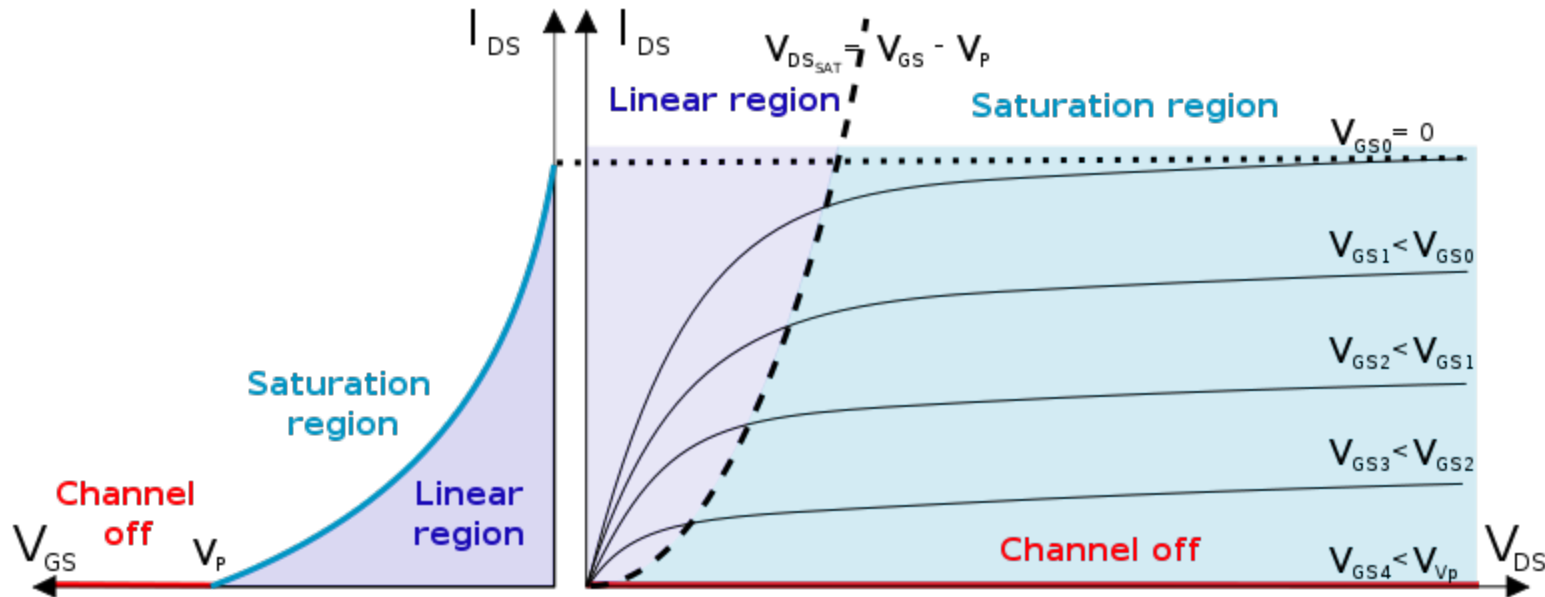
Simbol N-kanal JFETa



Simbol P-kanal JFETa

Kod navedenog simbola, gejt elektroda je pomerena ka sors elektrodi što označava da sors i drejn elektroda nisu zamenljive. Ukoliko se drejn elektroda nalazi na sredini, onda su sors i drejn elektroda zamenljive (biraju se po slobodnom izboru).

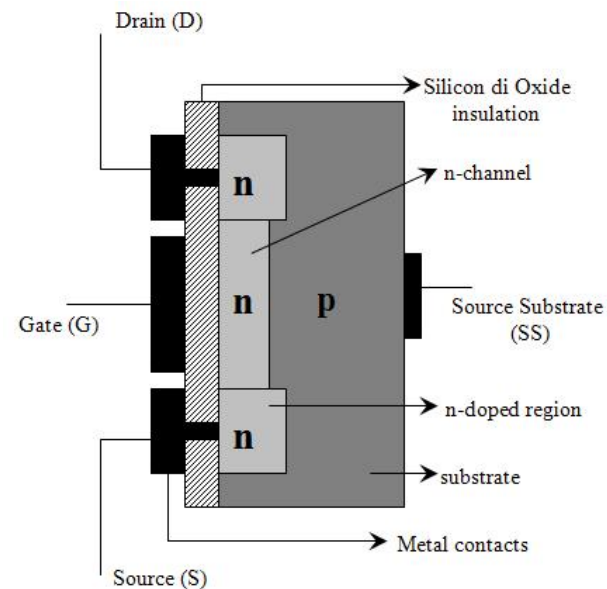
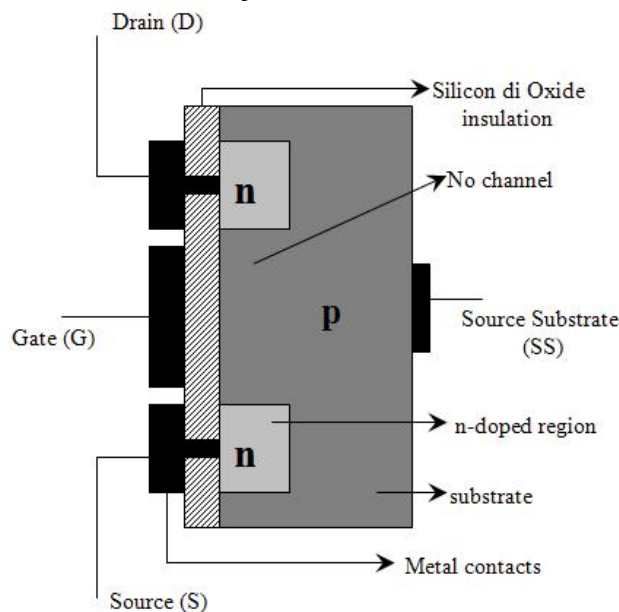
Izlazna karakteristika JFET tranzistora.



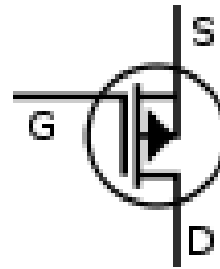
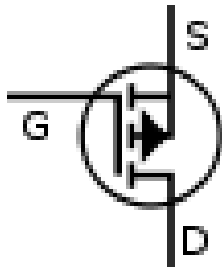
Izlazna karakteristika JFET tranzistora koja definiše struju drejna u funkciji napona drejna za različite nivoe pobude gejta. Uočavaju se tri regiona: 1) region u kome ne postoji provodni kanal – tranzistor je zakočen, 2) linearni region u kome tranzistor normalno funkcioniše i 3) region zasićenja.

FET tranzistor sa izolovanim gejtom - MOSFET tranzistor

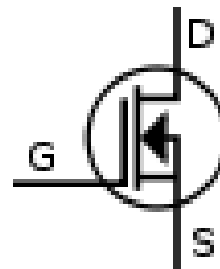
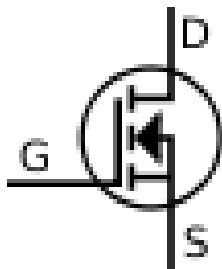
MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) je najčešće primenjivani oblik FET tranzistora. Sastoji se iz monokristalnog poluprovodničkog bloka (podloga) na čijim krajevima su izvedene dve metalne elektrode. Kao i kod JFET tranzistora ove elektrode nose naziv **sors** i **drejn** elektroda. Pod određenim uslovima, zavisno od napona na upravljačkoj **gejt** elektrodi, formira se provodno područje izmedju sors i drejn elektrode koje se naziva kanal. Za razliku od JFET tranzistora, izmedju gejta i kristalnog poluprovodničkog bloka postoji tanak izolacioni sloj izradjen od silicijum dioksida (odatle i potiče naziv ovog FET tranzistora). Princip funkcionisanja gejt elektrode je takodje drugačiji, naponskim potencijalom gejta utiče se na koncentraciju raspoloživih nosioca naelektrisanja u području izmedju sors i drejn elektrode, čime se ostvaruje regulaciona funkcija.



Simbol FET tranzistora sa izolovanim gejtom



CMOS FET sa kanalom P tipa



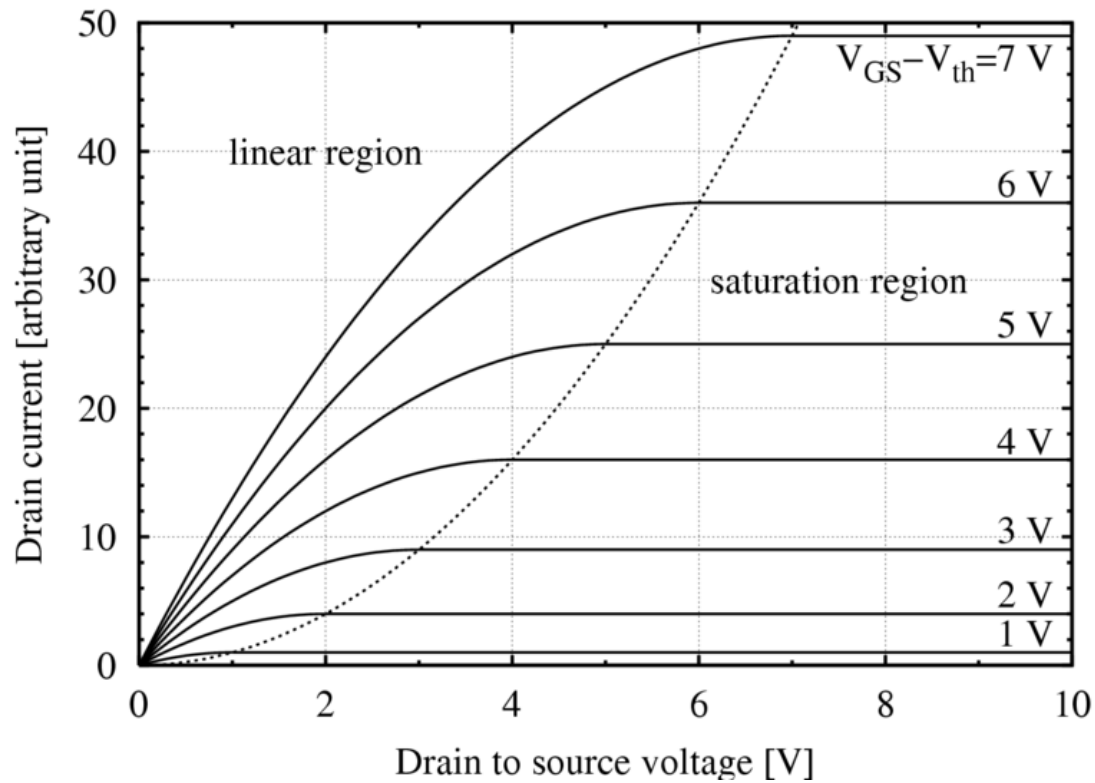
CMOS FET sa kanalom N tipa

CMOS FET obogaćen

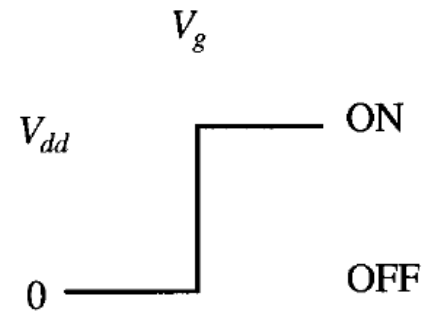
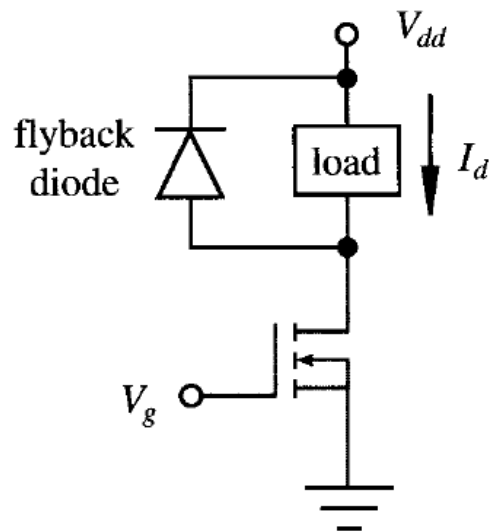
CMOS FET osiromašen

FET tranzistor sa izolovanim gejtom je najčešće upotrebljavani oblik tranzistora u gradnji elektronskih sklopova.

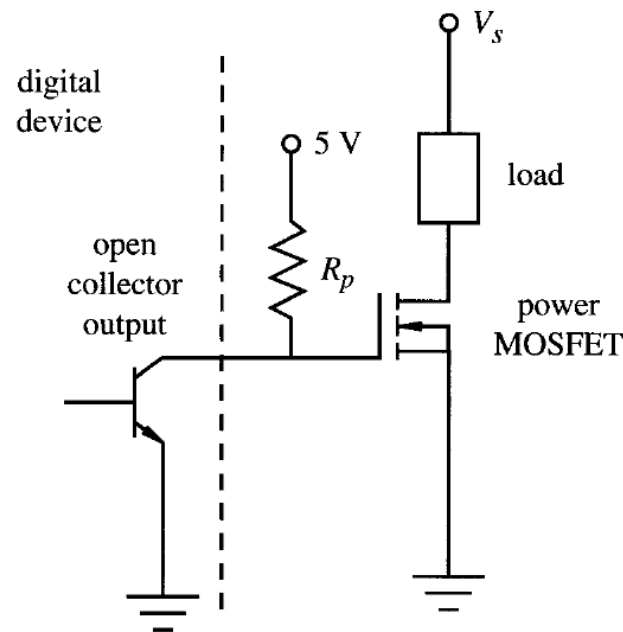
Izlazna karakteristika MOS FET tranzistora.



MOS FET tranzistor u kolu prekidača.



MOS FET tranzistor povezan na izlazni terminal mikrokontrolera koji je izveden kao bipolarni tranzistor sa otvorenim kolektorom. Otpornik R_p koji se eksterno dodaje na kolektorsku granu, kao 'pull up' otpornik. Kada se izlazni tranzistor mikrokontrolera nalazi u zakočenom stanju, preko otpornika R_p se na gejt MOSFET tranzistora dovodi TTL naponski potencijal od 5VDC, koji prevodi MOSFET tranzistor u provodno stanje. Prevodjenjem MOSFET tranzistora u provodno stanje, drugi kraj potrošača se dovodi na nulti naponski nivo i time se aktivira. Kada se izlazni tranzistor mikrokontrolera nadje u stanju zasićenja, gejt elektroda MOS FET tranzistora se dovodi na nulti naponski nivo, čime se on prevodi u zakočeno stanje i samim tim se potrošač deaktivira. Obratiti pažnju na to da se potrošač napaja naponom V_s , u opštem slučaju različitim od 5 V DC.



**b2: diskretni signali, digitalni ulazni i izlazni
 kanali, digitalni senzori i aktuatori**

Okruženje mikrokontrolera koji upravlja radom jednog mehatronskog sistema gotovo bez izuzetka sadrži senzorske i aktuacione elementa koji se u svom radu ponašaju diskretno. Primer su granični prekidači za inicijalizaciju ili dojavu krajnjih pozicija jedne servoupravljanje ose. Primer su sklopke i releji za aktuiranje elektromotora ili elektromagnetnih ventila. Takodje, primer su i različiti tasteri ili signalni elementi na komandnim tablama HMI uređaja koji su diskretne prirode.

Rad sa diskretnim signalima ove vrste se najčešće u žargonu naziva radom sa digitalnim izlazima ili ulazima, na osnovu prirode ulazno/izlaznih portova mikrokontrolera preko kojih se komunikacija/interakcija ove vrste ostvaruje sa realnim okruženjem.

Mada na prvi pogled trivijalan, rad sa digitalnim ulazno-izlaznim kanalima jednog mikrokontrolera poseduje određene specifičnosti koje se moraju uzeti u obzir. Te specifičnosti su posledica fizičkih svojstava diskretnih senzorskih elemenata (senzor ovde treba shvatiti u jednom vrlo širokom smislu) i aktuacionih elemenata.

U okviru ove nastavne celine biće obradjeni: 1)mehanički prekidači, 2)senzori sa digitalnim izlazom i 3)elektromagnetni releji.

Takodje, u okviru ove celine biće posebno razmatrani digitalni senzori za merenje linijskog i ugaonog pomeraja.

Mehanički prekidači



Mehanički prekidači:

U kontekstu mehatronskih sistema pod mehaničkim prekidačima podrazumevamo ulazne uređaje koji se sastoje iz mehanizma koji na mehaničkom principu prekida ili uspostavlja električno kolo.

Mehanički prekidači se svrstavaju u dve velike klase: 1) monostabilni – tasteri koji imaju jedno stabilno stanje u kome se prekidač nalazi uvek kada nije aktuiran nekom mehaničkom silom i 2) bistabilni – preklopnik koji ima dva stabilna stanja u koja prekidač prelazi dejstvom spoljašnje mehaničke sile. U praksi se sreću preklopnici i sa većim brojem stabilnih stanja, odnosno većim brojem položaja – takve prekidače nazivamo selektorima (od reči selekcija, što znači izbor neke logičke funkcije koja se ostvaruje uspostavljanjem neke od mogućih električnih veza).

Na osnovu električnog stanja u kome se nalaze kada nisu mehanički aktuirani, prekidače delimo na 1) normalno otvorene - u neaktuiranom stanju je električna veza razdvojena i 2) normalno zatvorene – u neaktuiranom stanju električna veza je uspostavljena.

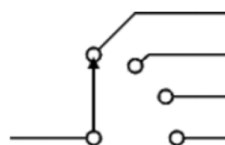
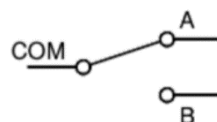
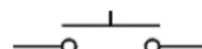
Prekidači se još mogu klasifikovati prema broju polova, odnosno veza koje se sinhrono uspostavljaju i raskidaju. Tako imamo jednopolne, dvopolne i višepolne. Na primer, prekidač koji se koristi za uključivanje i isključivanje trofaznog napajanja se po pravilu izvodi kao trolepolni (tri faze R, S, T) ili četvoropolni kada se raskida i nulti provodnik.

Primeri simboličkih oznaka najčešće korišćenih tipova prekidača.

Univerzum prekidača pored različitih funkcionalnih oblika sadrži i vrlo veliki broj konstrukcionih oblika i tehničkih rešenja, kako mehanizma uspostavljanja i rastavljanja kontakata, tako i mehanizama mehaničke akcije, sve u cilju zadovoljenja vrlo širokog spektra mogućih primena.

Pored toga, mehanički prekidači se mogu razlikovati po kapacitetu, odnosno po struji koju mogu da provedu i radnom naponu.

Simbol



Opis

Jednopolni bistabilni normalno otvoreni prekidač

Jednopolni monostabilni normalno otvoreni prekidač – jednopolni normalno otvoreni taster

Jednopolni naizmenični bistabilni prekidač

Dvopolni bistabilni normalno otvoreni prekidač

Dvopolni naizmenični bistabilni prekidač

Jednopolni četvoropoložajni selektor

Mehanički prekidači za primenu u industrijskoj automatizaciji

Mehanički prekidači koji se koriste u industrijskoj automatizaciji svrstavaju se u dve široke klase:

1. **Ručno aktuirani mehanički prekidači** namenjeni za izgradnju HMI sklopova (različiti oblici komandnih tabli) i
2. **Granični prekidači** namenjeni za registrovanje prisutnosti i dojavu kraja hoda nekog pokretnog mehanizma.

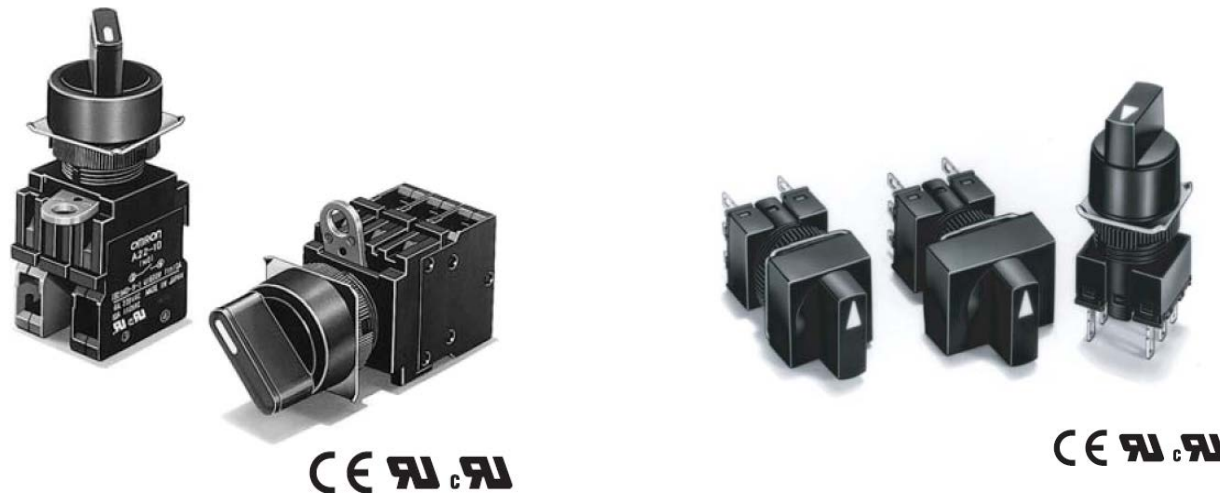
Pored geometrijskih karakteristika, kao što su veličina, način ugradnje, način aktivacije, otpornost na spoljašnje uticaje, kod specifikacije i izbora prekidača bitno je definisati, radni napon, radnu struju, broj uključivanja u jedinici vremena i vrstu opterećenja.

Anatomija ručno aktuiranih prekidača za primenu u industrijskoj automatizaciji

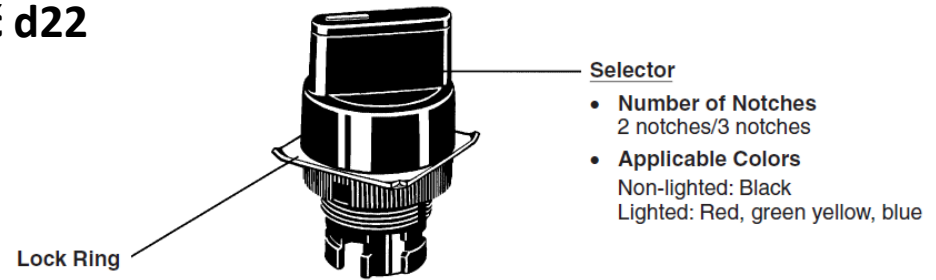
HMI prekidači za industrijsku automatizaciju se sreću u dva osnovna dimenziona standarda. Ovi standardi su su određeni otvorom za ugradnju na komandni panel.

To je standard sa nominalnim priključnim otvorom od 16mm i standard sa priključnim otvorom 22/25 mm.

Ovi prekidači se izvide kao modularne konstrukcije, koje se sastoje iz aktucionog modula (različiti mehanizmi ručnog aktuiranja), modula električnog preklopnog mehanizma i modula noseće strukture sa mehanizmom za ugradnju i učvršćivanje. Prekidači nominalnog priključnog otvora d16 su kompaktni minijturni prekidači za ograničeni prostor ugradnje.



Primer 1: Obrtni mehanički prekidač d22



Selector

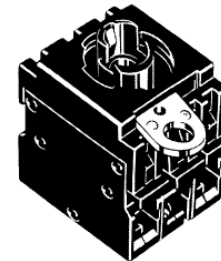
- Number of Notches
2 notches/3 notches
- Applicable Colors
Non-lighted: Black
Lighted: Red, green yellow, blue

Lock Ring



Lamp

- Light Source
LED lamp
Incandescent lamp



Switch

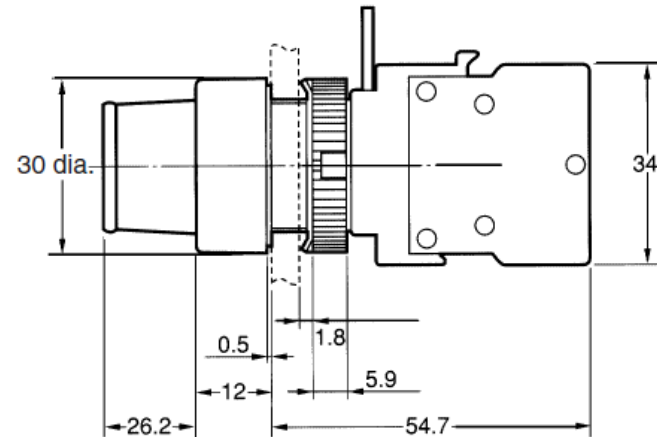
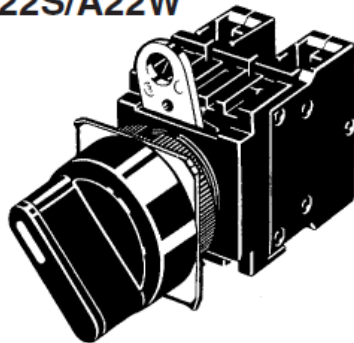
- Contacts
SPST-NO, SPST-NC, SPST-NO + SPST-NC,
DPST-NO, DPST-NC
(Minimum applicable load: 10 mA at 5 VDC)
- Lighting Method
Non-lighted
Lighted (without Voltage Reduction Unit)
Lighted (with Voltage Reduction Unit)



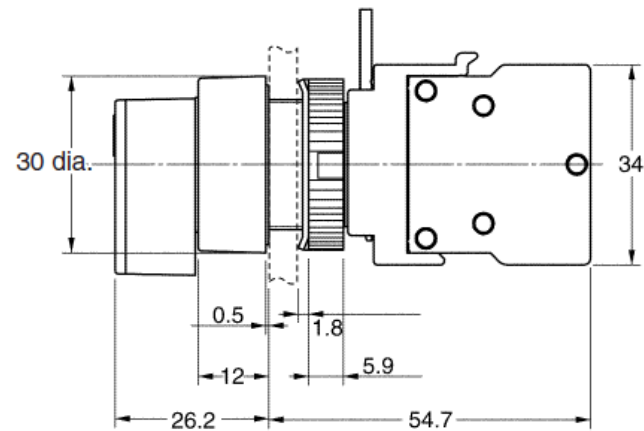
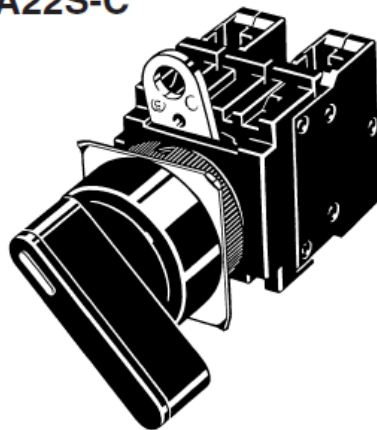
Modularna konstrukcija prekidača obezbedjuje veliku varijantnost funkcija mehaničke akcije i električnih funkcija. Na navedenoj slici, prikazana je potpuna konfiguracija koja pored akcionog modula (prikazan u gornjem delu) i modula električnog preklopnog mehanizma koji je prikazan u sklopu sa modulom noseće strukture, ima i modul za signalizaciju stanja pomoću odgovarajućeg svetlosnog izvora.

Prikaz detalja ugradnje prekidača u kontrolni panel

A22S/A22W



A22S-C



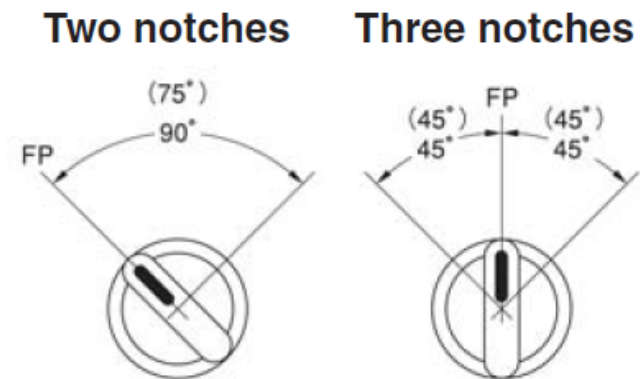
Varijantni oblici broja položaja obrtnog aktucionog mehanizma

Aktuacioni mehanizam se izvodi kao dvopoložajni i kao tropoložajni.

Kod dvopoložajnog mehanizma moguće su dve varijante: bistabilna i monostabilna.







Kod tropoložajnog mehanizma moguća su četiri varijantna oblika. Varijantni oblik sa tri stabilna stanja, varijantni oblik sa jednim stabilnim stanjem u središnjem položaju i dva monostabilna položaja, varijantni oblik sa dva stabilna i jednim monostabilnim bočnim stanjem u levoj i desnoj formi.

Na ovaj način se može realizovati veliki broj varijantnih oblika komandovanja, koji će u sebi sadržati intuitivnost i sigurnost za neki specifični kontekst primene.



Note: 1. The angle used for automatic reset is shown in parentheses.

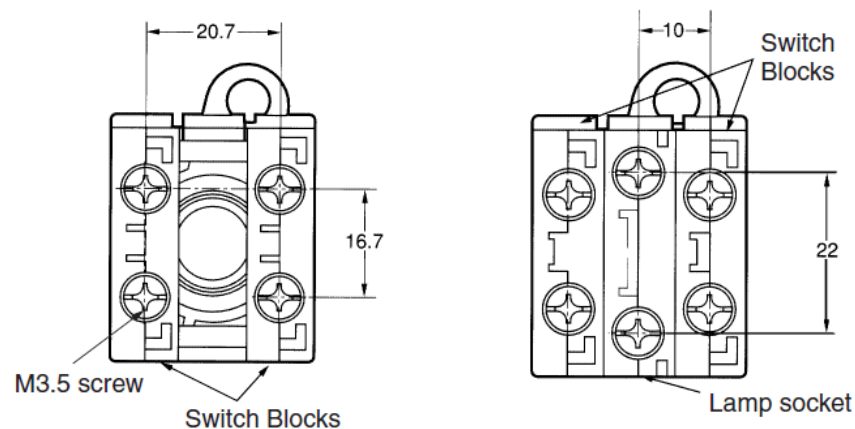
2. FP: Free Position

Notches	Reset method	Standard lever IP65 (oil-resistant)
2 notches	Manual 	A22S-2M
	Automatic 	A22S-2A
3 notches	Manual 	A22S-3M
	Automatic 	A22S-3A
	Left automatic 	A22S-3AM
	Right automatic 	A22S-3MA



Prethodno navedene varijantne oblike prate odgovarajuće kontaktne šeme električnih preklopnika koji se kao jednopolni moduli ugradjuju u telo prekidača. Na raspolaganju stoje tri ugradna mesta u koja se mogu ugraditi dva preklopna modula (normalno otvoreni i normalno zatvoreni *switch block*) i modul svetlosne signalizacije (*lamp socket*) koji se ulaže u centralnu poziciju.

Kod dvopoložajnog mehaničkog obrtnog prekidača moguće je ugraditi jedan preklopni modul, ili alternativno dva preklopna modula. Kod tropoložajnog prekidača ugradjuju se uvek dva preklopna modula (moguće konfiguracije su prikazane u tabeli ispod).



2-notch Type

Knob position	SPST-NO	SPST-NC	SPST-NO + SPST-NC	DPST-NO	DPST-NC

3-notch Type

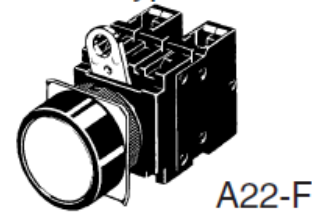
Knob position	SPST-NO + SPST-NC	DPST-NO	DPST-NC

Primer 2: Pritisni mehanički prekidač d22

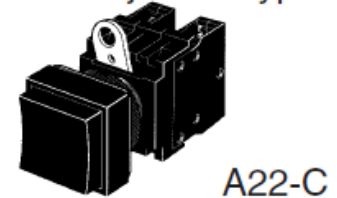
Ovo je oblik prekidača koji se masovno primenjuje u industriji. U odnosu na prethodno navedeni primer, razlika postoji samo u akcionom mehanizmu koji se sem jednog izuzetka izvodi kao monostabilni. Na desnoj strani dat je prikaz mogućih varijantih formi pritisknog dugmeta, koji su prilagodjeni konkretnom slučaju primene. Osnovna karakteristika koja se varira odnosi se na zaštitu od slučajnog aktiviranja, pa tako postoje nezaštićeni, delimično zaštićeni i potpuno zaštićeni oblici kružnog i kvadratnog profila. Prekidač može da bude opremljen elementom za svetlosnu signalizaciju. Izbor zaštite od slučajnog aktiviranja treba uskladiti za zahtevom vidljivosti signalizacije.



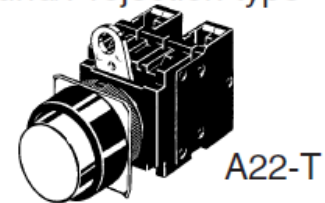
Round/Flat type



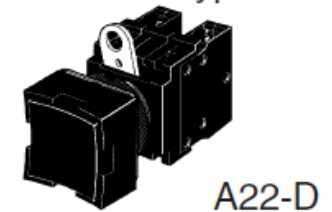
Square/Projection type



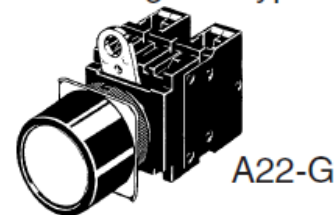
Round/Projection type



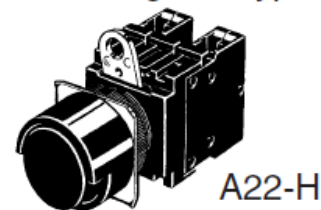
Square/Guard type



Round/Full-guard type



Round/Half-guard type



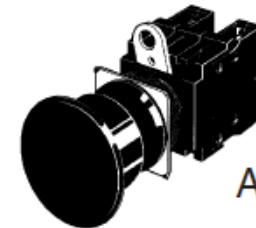
Pored prethodno navedene monostabilne forme, postoji i bistabilna forma koja je po pravilu namenjena za takozvanu SVE-STOP funkciju. Sve-stop funkcija je namenjena za ekscesne situacije, odnosno situacije havarije i neregularnog rada mehatronskog sistema, kada se mora brzo reagovati i blokirati dalji rad sistema. Aktuacioni modul se izvodi u obliku pečurke, sa posebnim mehanizmom za deaktiviranje (prekidač mora da ostane u aktuiranom stanju neograničeno dugo, do trenutka kada se problem eliminiše). Ovi prekidači se uvek izvode kao normalno zatvoreni, tako da se aktuiraanjem raskida električna veza. Na ovaj način se obezbedjuje logička sigurnost. Prekidač je uvek crvene boje a podloga je standardizovanog oblika i uvek žute boje.

Round/Small-size
Mushroom type
(30-dia. head)



A22-S

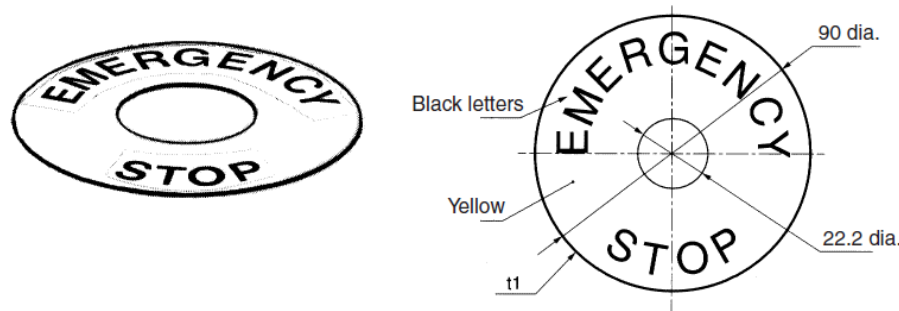
Round/Medium-size
Mushroom type
(40-dia head)



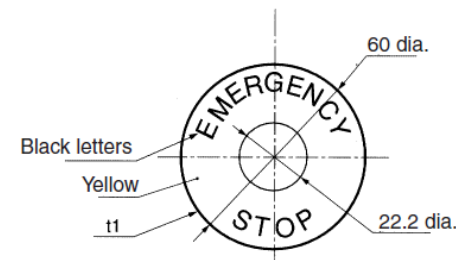
A22-M

For Emergency-stop Models

A22Z-3476-1 (90 dia.)

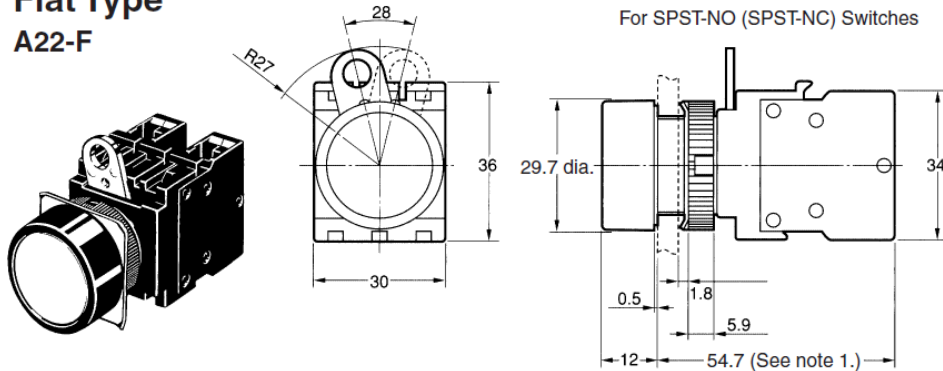


A22Z-3466-1 (60 dia.)

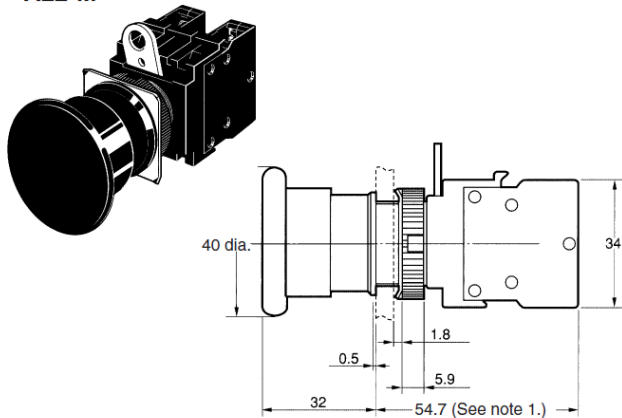


Prikaz modularne konstrukcije pritiskog prekidača.

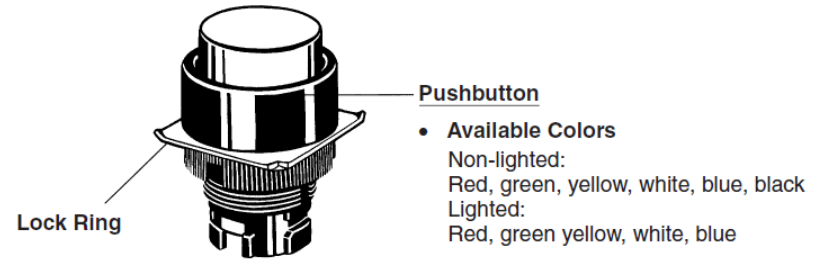
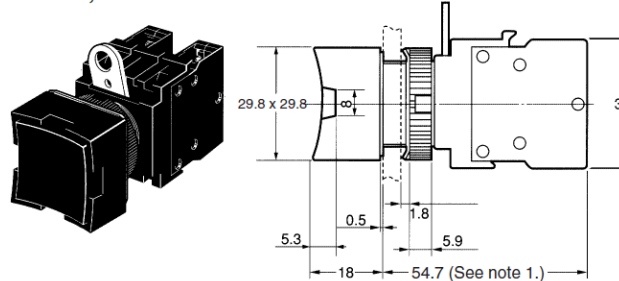
Flat Type A22-F



40-dia. Mushroom Type A22-M



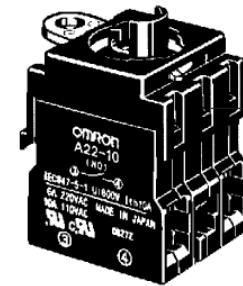
Square/Full-guard Type A22-D, A22L-D



- Pushbutton**
- Available Colors
 - Non-lighted: Red, green, yellow, white, blue, black
 - Lighted: Red, green yellow, white, blue



- Lamp**
- Light Source
 - LED lamp
 - Incandescent lamp

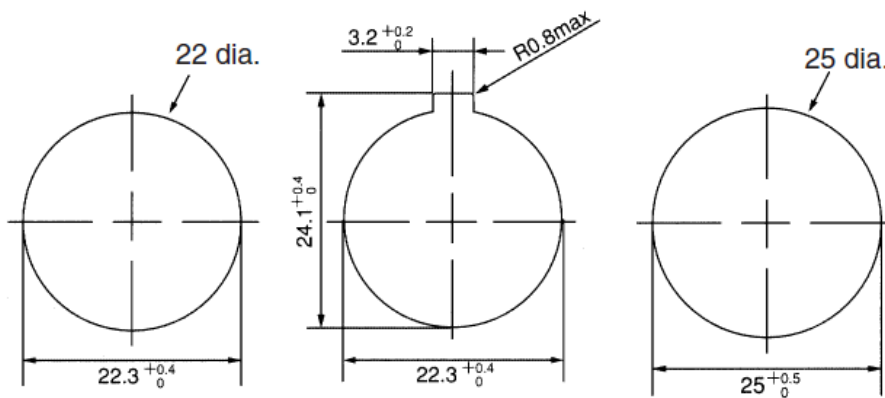


- Switch**
- Contacts
 - SPST-NO, SPST-NC, SPST-NO + SPST-NC, DPST-NO, DPST-NC
 - (Minimum applicable load: 10 mA at 5 VDC)
 - Lighting Method
 - Non-lighted
 - Lighted (without Voltage Reduction Unit)
 - Lighted (with Voltage Reduction Unit)

The above illustration shows a lighted model.

Detalji ugradnje

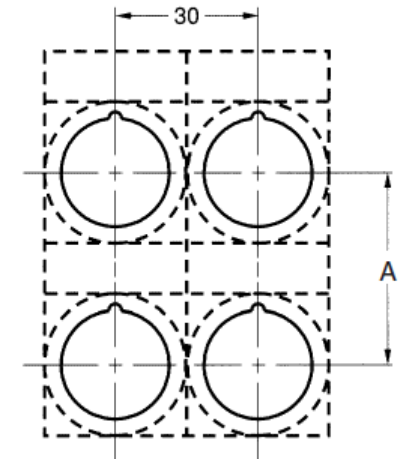
Izvodjenje otvora



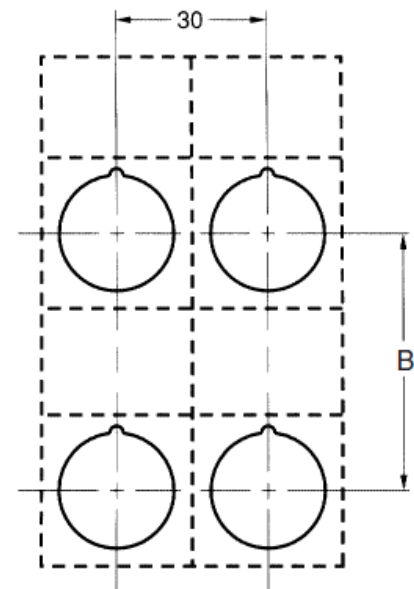
Debljina panela 1 do 5 mm

Matrica lokacije prekidača:

A_min = 45 ili
55 mm

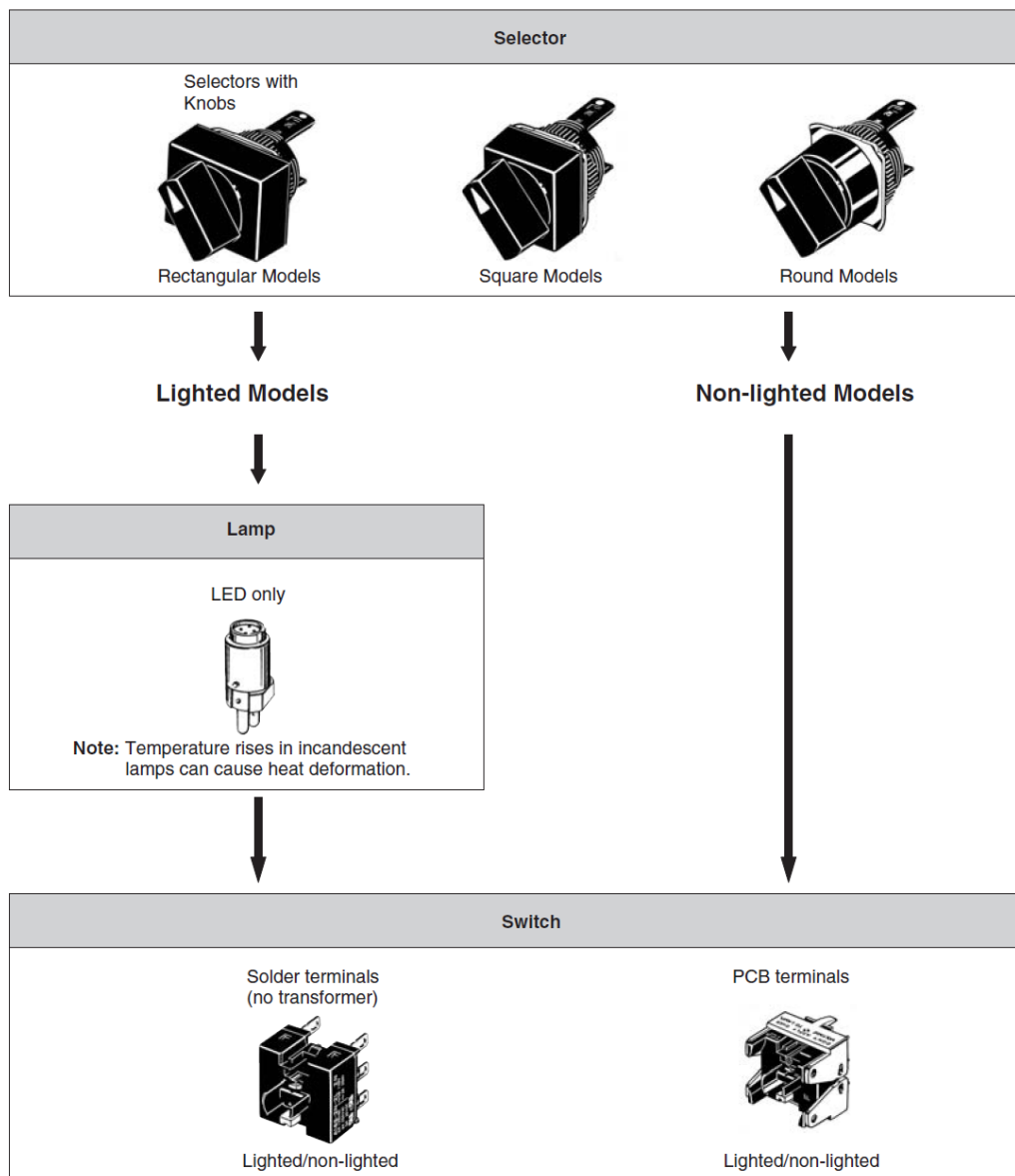


B_min = 50, 61, ili
60, 70mm u
zavisnosti od
karakteristika
preklopnih modula



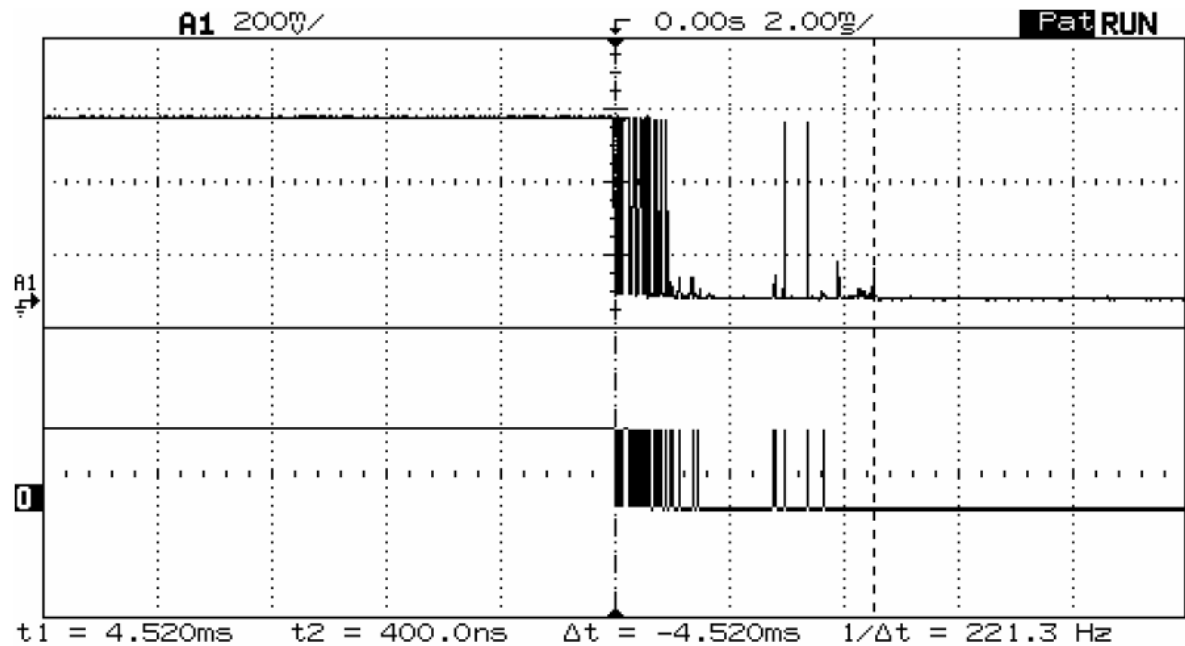
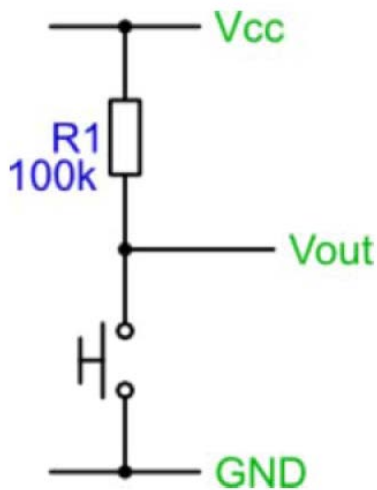
Primer 3: Obrtni mehanički prekidač d16

Ova veličina prekidača spada u minijaturne prekidače za ugradnju na komandne table velike gustine pakovanja. Prekidači su modularne gradnje i sastoje se iz aktucionog modula i električnog modula. Za razliku od prekidača nominalne veličine 22mm, kod ove vrste prekidača provodnici se spajaju lemljenjem, a postoji i specijalno oblikovani preklopni modul koji se može ugraditi na štampanu ploču (jednostavnije i pouzdanije ožičenje)



Problem nestabilnosti u prelaznom režim rada prekidača

Zbog mehaničke aktuacije, kretanje kontakata se ostvaruje po zakonima mehanike, a tada se u prelaznom režimu uspostavljanja ili raskidanja kontakata može pojaviti odskakivanje. Mada se ova pojava dešava u vrlo kratkom vremenu, samo nekoliko milisekundi, to je vremenski interval koji je za rad savremenih mikroprocesorskih upravljačkih sistema vrlo dug, tako da sistem može da umesto jednog ciklusa uspostavljanja ili raskidanja kontakta, registruje veći broj ovakvih uzastopnih ciklusa, što može da stvori velike probleme sa aspekta logičkog funkcionisanja upravljačkog sistema. Ovaj se problem na engleskom naziva *bouncing*, a procedura njegovog rešavanja *debouncing*.

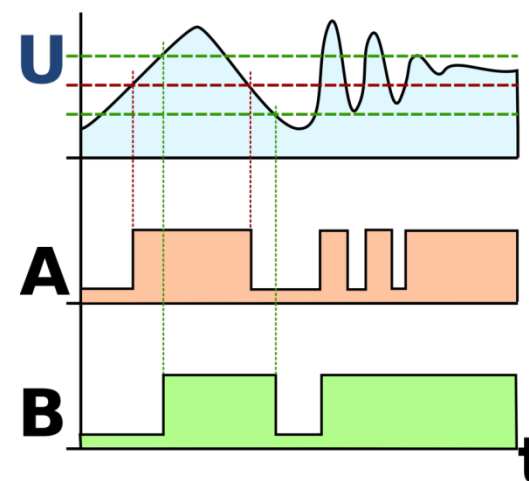


Postoje tri načina za rešavanje problema odskakivanja kontakt prekidača u prelaznom režimu rada:

1. Elektronska filtracija analognim elementima
2. Elektronska filtracija digitalnim elementima
3. Softverska filtracija

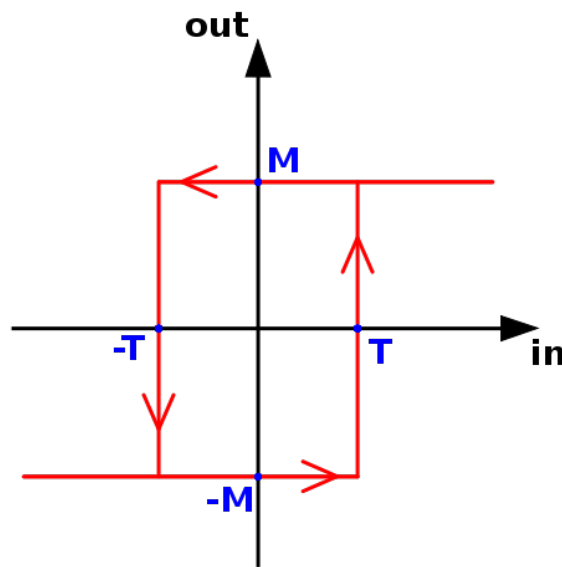
Filtracija primenom elektronskih kola sa analognim elementima bazirana je na posebnom logičkom kolu koje sadrži pozitivnu povratnu spregu. Pozitivna povratna sprega unosi histerezis kojim se potiskuju brze promene izazvane odskakivanjem kontakata prekidača ili šumom koji je prisutan u korisnom signalu. Na dijagramu ispod prikazan je originalni analogni signal koji sadrži nestacionarnu komponentu različite dinamike.

Uobličavanje ovog signala, odnosno njegovo prevodjenje u dva diskretna stanja (naponska nivoa), moguće je ostvariti komparatorским kolom čije je ponašanje izraženo dijagramom A. Alternativno, uobličavanje se može ostvariti kolom koje sadrži histerezis, a njegovo ponašanje je izraženo na dijagramu B. Za razliku od komparatorskog kola koje uvek reaguje na prelazak kroz neki zadati nivo (crvena isprekidana linija), kolo sa histerezisom reaguje na dva različita nivoa, čime se postiže mnogo kvalitetniji oblik uobličenog signala. Ovo kolo se naziva Šmitov okidač (*Schmitt trigger*).

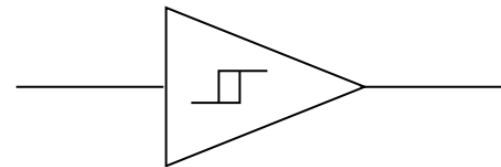


Šmitov okidač

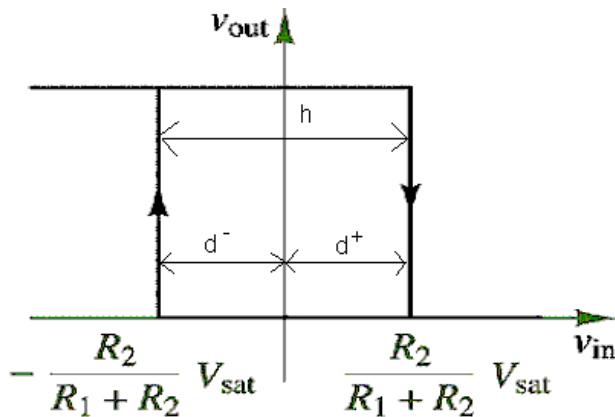
Histerezisna petlja ovog kola prikazana je na dijagramu ispod. Kada ulazni signal dostigne nivo T , tada se na izlazu kola generiše neki naponski nivo $+M$. Taj naponski nivo se zadržava bez obzira na fluktuaciju ulaznog signala sve do trenutka kada ulazni signal ne predje ispod donje granice $-T$. U tom trenutku se nivo izlaznog signala prevodi na drugu stabilnu vrednost $-M$. Dalja fluktuacija ulaznog signala se neće odražavati na generisani izlaz sve do trenutka kad on ne dostigne gornji granični naponski nivo $(+T)$, kada ovo kolo prelazi u stanje koje generiše visoki naponski izlaz $(+M)$. Očigledno je da kolo Šmitovog okidača poseduje dva stabilna diskretna stanja koja su upravljana kontinualnim analognim signalom na njegovom ulazu. Ovakva naponska karakteristika se naziva histerezis, a dijagram histerezisna petlja.



Električni simbol Šmitovog okidača



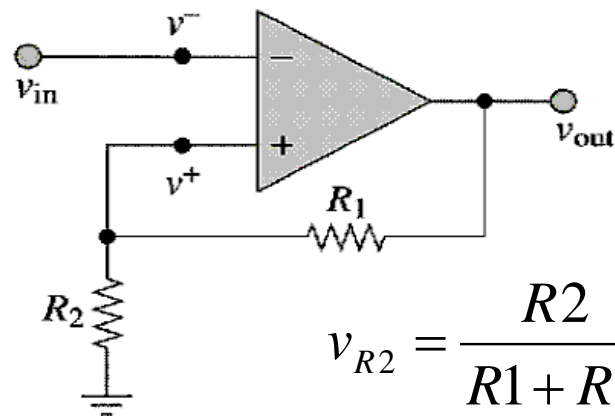
Dalje se navodi fizička realizacija ovog kola primenom operacionog pojačivača sa **pozitivnom povratnom spregom**. Kolo potiskuje sve varijacije ulaznog signala u intervalu $\pm V_{sat} [R_2 / (R_2 + R_1)]$. Na ovaj način kolo Šmitovog okidača sprečava pojavu višestrukog okidanja koje se sreće kod rada komparatora.



$$v_{out} = v_{ref} + v_{R2} + v_{R1} \quad v^+ = v_{ref} + v_{R2}$$

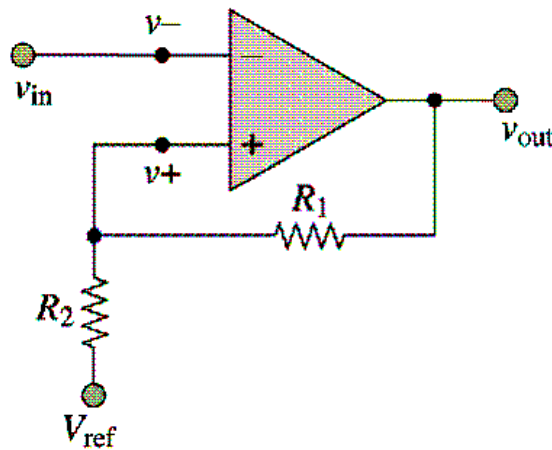
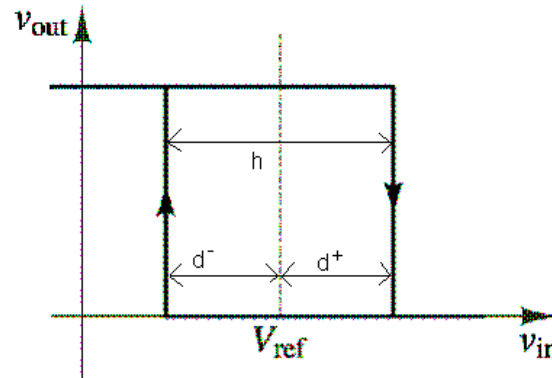
$$v_{R1} = \frac{R1}{R1 + R2} (v_{out} - v_{ref})$$

$$v_{R2} = \frac{R2}{R1 + R2} (v_{out} - v_{ref})$$

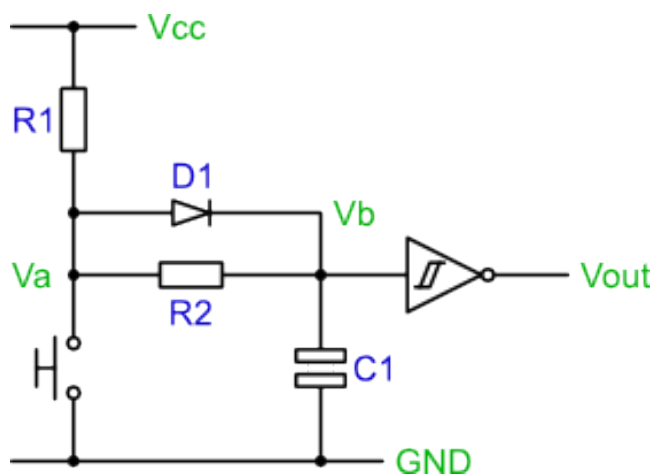


$$v_{R2} = \frac{R2}{R1 + R2} (\pm V_{sat} - v_{ref}) \quad v^+ = v_{ref} + \frac{R2}{R1 + R2} (\pm V_{sat} - v_{ref})$$

Ukoliko je potrebno da se interval histerezisne petlje dovede na neki drugi referentni napon različit od 0V, onda se na neinvertujući ulaz diferencijalnog pojačivača dovodi željeni referentni napon V_{ref} , čime se histerezisna petlja translira na drugi naponski nivo, zadržavajući u svemu svoje ponašanje.

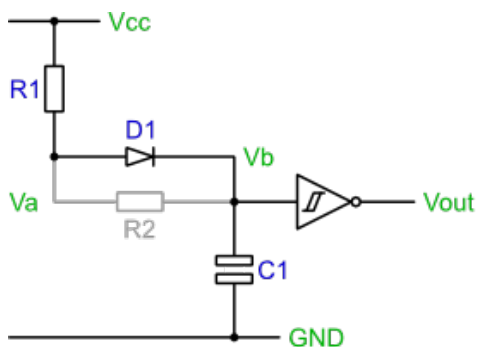


Efikasna primena Šmitovog okidača zahteva **prethodnu filtraciju ulaznog signala**, kako bi se eliminisale ekstremne fluktuacije koje prate prelazni proces. Kondenzator C1 koji je paralelno vezan na ulazu Šmitovog kola filtrira (potiskuje) visoke harmonike u oba slučaja, i kod otvaranja i kod zatvaranja prekidača. Preostale niskofrekventne fluktuacije napona dalje uspešno kompenzuje Šmitov okidač, čime se dobija uobličen signal dobre dinamike.

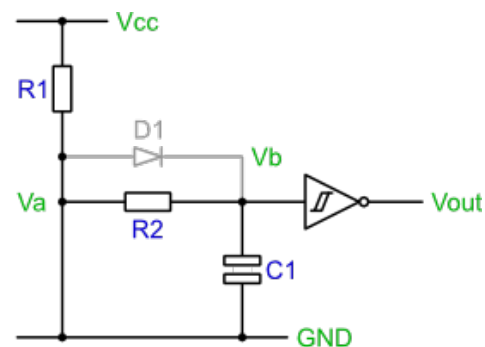


U slučaju otvorenog prekidača napon se preko otpornika R1 i diode D1 dovodi na ulaz Šmitovog okidača i tako se generiše viši naponski nivo na izlazu. Da bi se ovaj prelaz ostvario u što kraćem vremenu primenjena je dioda kojom se premošćava otpornik R2 i tako skraćuje vreme punjenja kondenzatora C1.

U slučaju zatvorenog prekidača, kondenzator se prazni preko otpornika R2, čime se na ulazu Šmitovog kola generiše naponski nivo ispod donje granice okidanja, što generiše niži naponski nivo na njegovom izlazu.



Prekidač otvoren



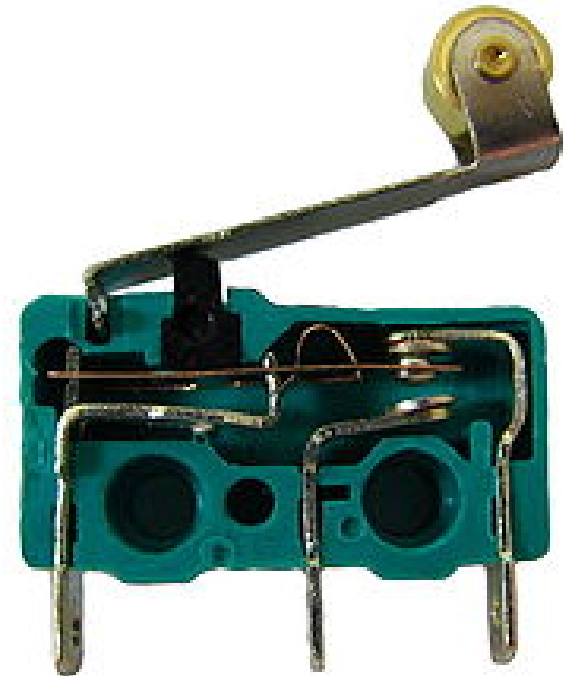
Prekidač zatvoren

Mehanički granični prekidač

Za rada mehatronskih sistema od posebnog značaja su mehanički prekidači koji su aktirani delovima mehanizma čijim se radom upravlja. Ove prekidače nazivamo graničnim prekidačima zato što oni po pravilu registruju neke diskretne granične položaje u koje se može naći mehanizam mehaničke strukture upravljanog sistema.

Granični prekidači se po pravilu izvode kao monostabilni.

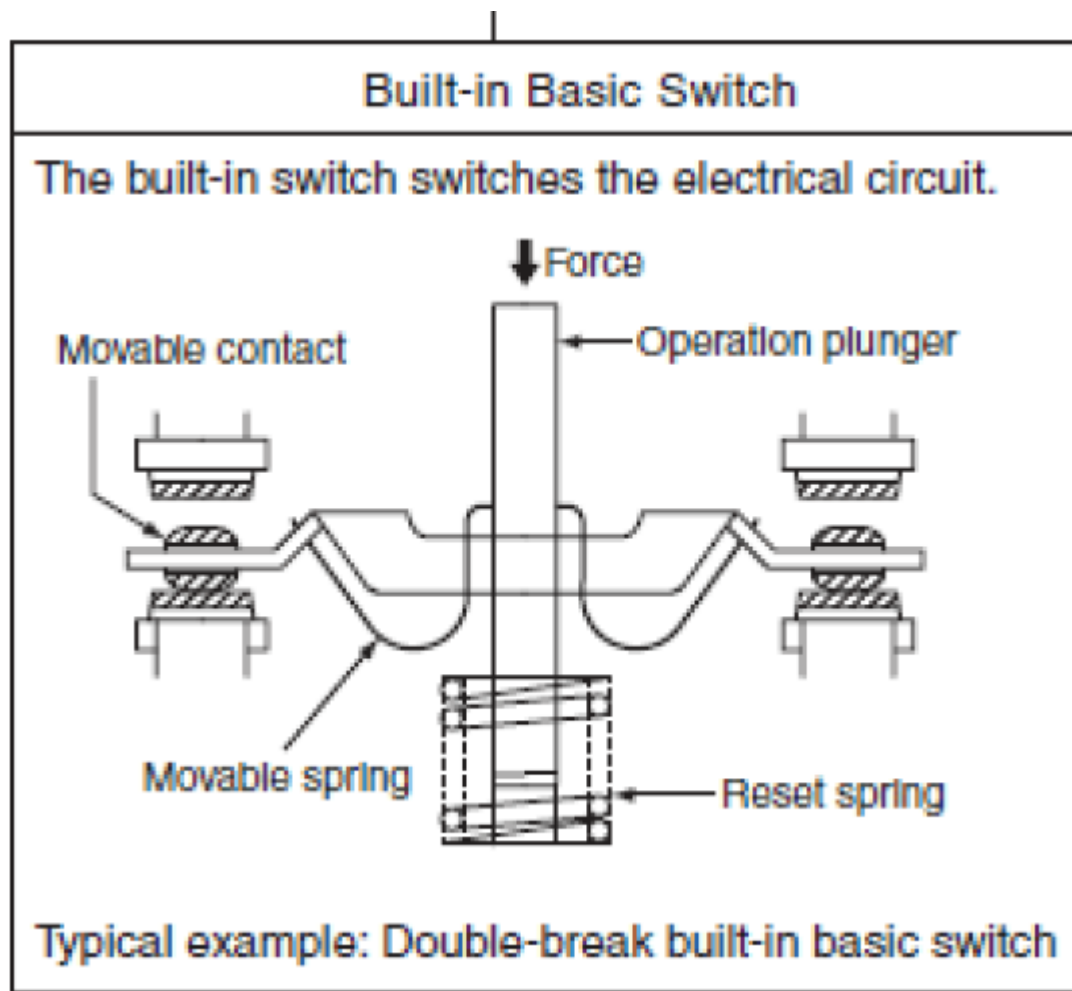
Generički oblik prekidača ove vrste prikazan je na navedenoj slici. Radi se o takozvanom mikro prekidaču, koji se odlikuje vrlo malim hodom pobudnog mehanizma potrebnim za prelazak iz jednog u drugo stanje. Ovakva konstrukcija je neophodna zbog ostvarivanja dovoljne mehaničke osetljivosti akcionog sklopa na male pomeraje, čime se dalje ostvaruje potrebna mehanička preciznost. Mikroprekidači se zapravo odlikuju malim radnim hodom i specijalnim elastičnim mehanizmom koji akumulira energiju tokom akcionog hoda do trenutka kada se dostigne kritična granica kada on naglo prelazi u stanje uspostavljanja ili raskidanja kontakta.



U zavisnosti od konstrukcije mehanike aktucionog sklopa prekidača ostvaruju se različite prekidačke karakteristike. Kvalitetni mikroprekidači imaju histerezisnu petlju koju ostvaruje Šmitov okidač, tako da se problem nestabilnosti tipa odskakivanja u velikoj meri rešava već u samom preklopnom mehanizmu.

	(1) Plunger	(2) Hinge Lever	(3) Roller Lever
Drive mechanism of limit switch			
Movement of auxiliary plunger			
Force vs. stroke characteristic			
Precision	High	Normal	Low to normal

Detalj radnog dela preklopnog mehanizma prekidača.



Mehanički prekidači su jedan od najkritičnijih elemenata mehatronskih sistema i od njihove pouzdanosti najčešće zavisi pouzdanost sistema u celini. Da bi se ostvarila visoka mehanička robusnost, modul mikroprekidača se ugradjuje u masivno, hermetički zaptiveno kućište, koje štiti osetljiv preklopni sklop od mehaničkog preopterećenja, vlage, kontaminacije, temperaturnih oscilacija i svih drugih neželjenih uticaja sredine.



Head

The head is an independent mechanism of the Switch and incorporates an actuator mechanism.

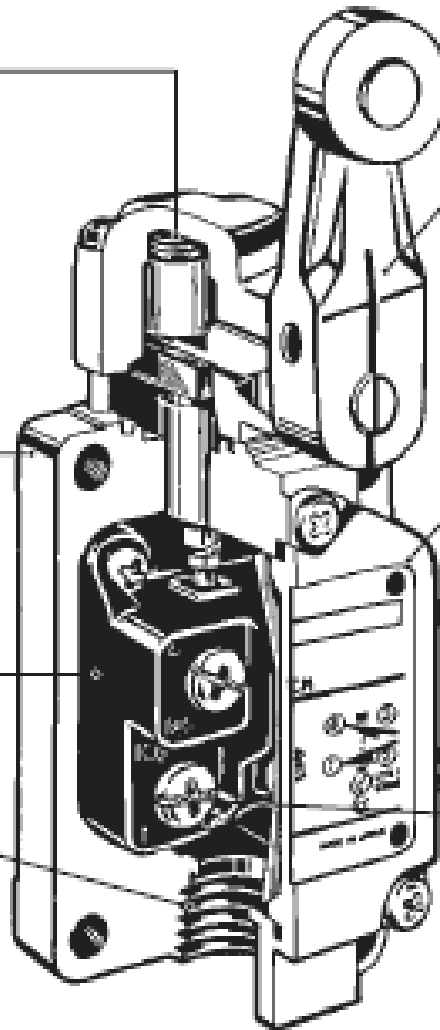
Switch Casing

The Switch casing, which is also called housing, protects the Switch mechanism.

Built-in switch

Conduit Opening

The conduit opening is an outlet where electric wires are connected and sealed.



Actuator

The actuator is a part of the Switch. External force imposed on the actuator is relayed to the internal spring mechanism, thus operating the movable contact to turn the Switch ON or OFF.

Cover

The cover attached after internal wiring ensures the sealing capability of the Switch.

Terminals

The terminals are where electrical wires are connected for input and output of the Switch.

Višepolni krajnji prekidači za primenu kod mašina alatki, robotici i industrijskoj automatizaciji

Kod neke linearane ili obrtne ose, gotovo bez izuzetka potrebno je obezbediti informaciju da je klizač ili obrtni zglob dostigao neki od dva ekstremna položaja, kao i da se nalazi u nekom inicijalnom položaju od koga se dalje vrši referenciranje pomeraja duž ose po kojoj se kretanje ostvaruje. Minimalna konfiguracija u ovom slučaju se sastoji iz dva prekidača ugradjenih u zajedničko kućište. Situacija u kojoj se dojavljuje inicijalni položaj zahteva tri prekidača, odnosno trolpolni prekidački modul/blok.



U izvesnim situacijama, kada postoje neke dodatne karakteristične pozicije duž upravljane ose, koriste se višepolni prekidači ove vrste sa 4 ili više polova.

Osnovna odlika ovih prekidača je mehanička robusnost i veliki broj radnih ciklusa koji se kreće u intervalu od 10^6 do 10^7 .



Tipične električne karakteristike preklopnog modula koji se koristi kod višepolnih prekidača. Sklop preklopnika se po pravilu izvodi kao naizmenični prekidač. Korisnik uvek može da bira jednu od opcija, normalno otvoreni i normalno zatvoreni kontakt. Ovo nije pitanje slobodnog izbora, već se radi o vrlo strogim funkcionalnim zahtevima koji će biti obrđivani u modulu kursa Mehatronskih sistema koji se odnosi na servoregulisane ose.

Ratings

Standard Model

Rated voltage	Resistive load	
	NC	NO
125 VAC	10 A	
250 VAC	10 A	
125 VDC	0.6 A	
250 VDC	0.3 A	

Note: The above currents are steady-state currents.

Inrush current	NC	24 A max.
	NO	24 A max.

Micro Load Ratings

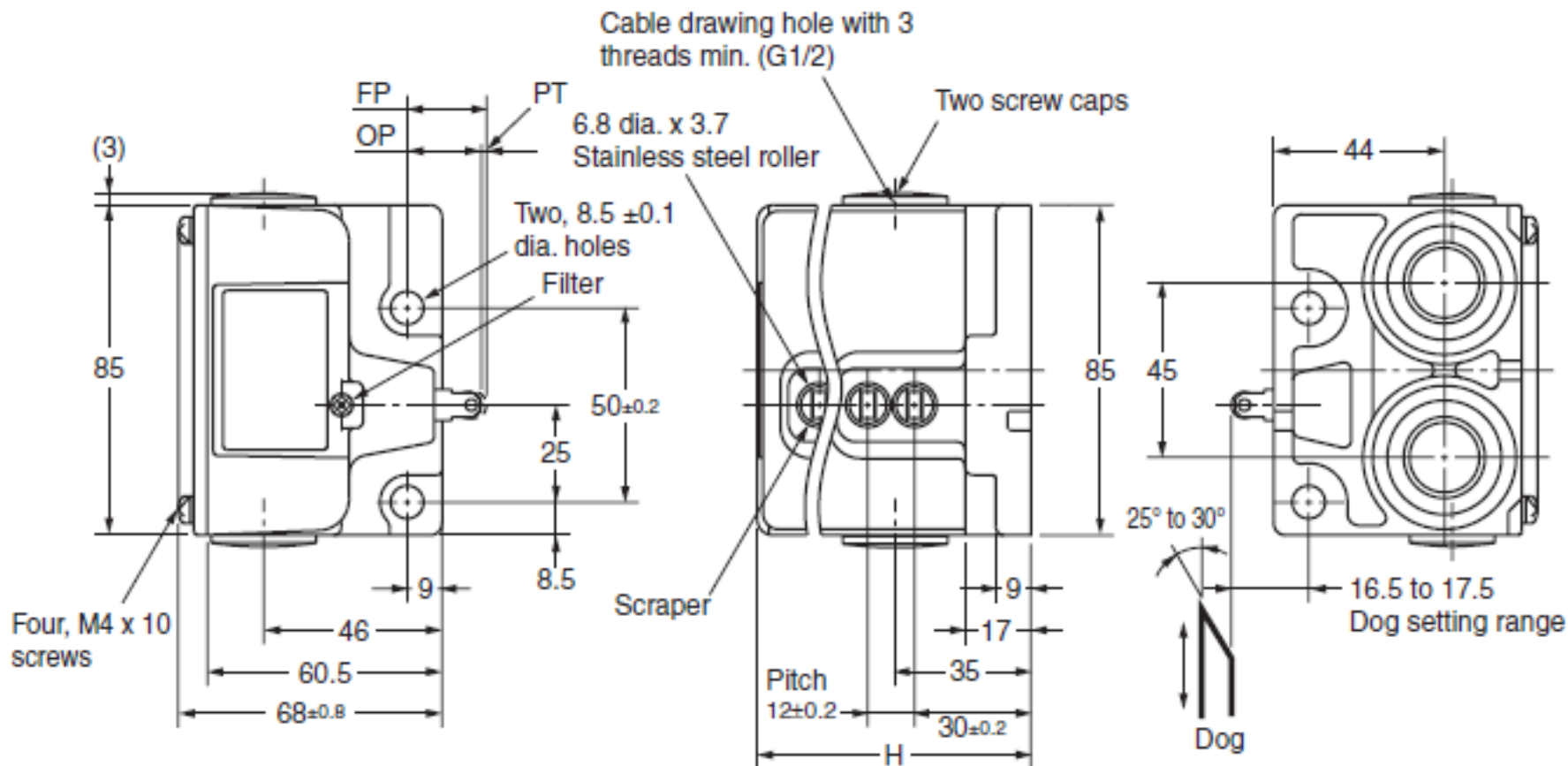
Rated voltage	Resistive load
125 VAC	0.1 A
8 VDC	
30 VDC	



Tipične električne elektromehaničke karakteristike višepolnih prekidača za primenu u gradnji mašina alatki i slične industrijske automatizacije.

Treba uočiti razliku između broja mehaničkih i električnih ciklusa. Broj električnih ciklusa uslovljen je vrstom električnog kola koje se priključuje na kontakte prekidača. Ukoliko se radi o čisto otpornom kolu, onda je električno opterećenje malo i prekidač može da izdrži ekstremno veliki broj ciklusa. Nasuprot tome, ukoliko je kolo induktivnog tipa, onda su prelazne pojave zbog struja samoindukcije vrlo intenzivne i to dovodi do mehaničke erozije kontakata i drastičnog skraćivanja veka prekidača. Rešenje ovog problema je moguće uvođenjem korekcije impedanse primenom kondenzatora ili sličnih kompenzacionih elemenata, koji apsorbiraju poremećaje ovog tipa.

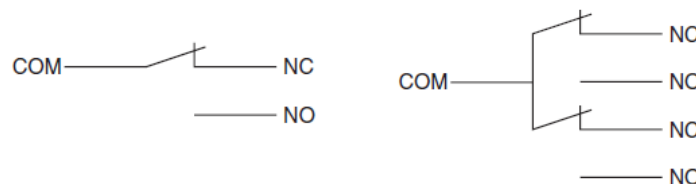
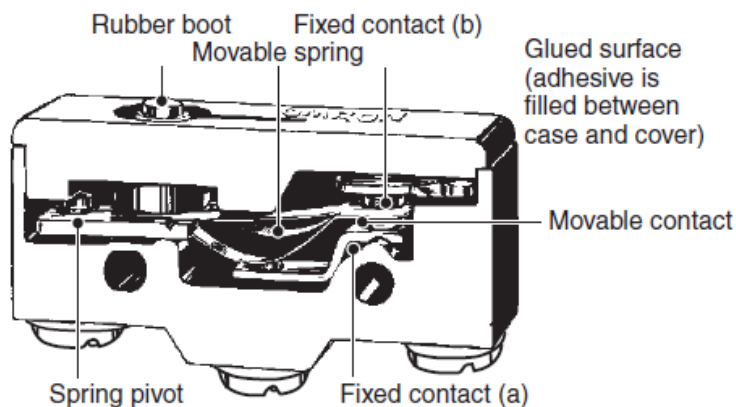
Degree of protection		IP67
Durability *	Mechanical	5,000,000 operations min.
	Electrical	300,000 operations min. (10 A at 250 VAC, resistive load)
Operating speed		0.1 mm to 0.5 m/s
Operating frequency	Mechanical	120 operations min.
	Electrical	30 operations min.
Rated frequency		50/60 Hz (AC)
Insulation resistance		100 MΩ min. (at 500 VDC)
Contact resistance		15 mΩ max. (initial value)
Dielectric strength	Between terminals of same polarity	1,000 VAC/U _{imp} 4,000 VAC
	Between current-carrying metal parts and ground	1,500 VAC/U _{imp} 4,000 VAC
	Between each terminal and non-current-carrying metal part	1,500 VAC/U _{imp} 4,000 VAC
	Between terminals of different polarity	U _{imp} 4 kV (EN60947-5-1)
Rated insulation voltage (U_i)		300 VAC (EN60947-5-1)
Switching overvoltage		1,000 V max. (EN60947-5-1)
Pollution degree (operating environment)		3 (EN60947-5-1)



Operating characteristics		Model	VB-□221 VB-□211	VB-□251 VB-□241	VB-□121 VB-□111	VB-□151 VB-□141
Operating force	OF max.		14.71 N	14.71 N	14.71 N	14.71 N
Release force	RF min.		4.90 N	4.90 N	4.90 N	4.90 N
Pretravel	PT max.		1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm
Overtravel *1	OT min.		(3.5 mm)	(3.5 mm)	(3.5 mm)	(3.5 mm)
Movement Differential	MD max.		0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm
Operating Position	OP		32±0.4 mm	19±0.4 mm	26±0.4 mm	13±0.4 mm
Free Position *1	FP max.		(33 mm)	(20 mm)	(27 mm)	(14 mm)

Primer varijantnih oblika graničnih mikroprekidača za ugradnju u sistema industrijske automatizacije i različite mehatronske sisteme:

Prekidač je dimenzionisan za radni napon od 250 VAC i maksimalnu struju od 15 A. Odlikuju se vrlo preciznim preklopnim mehanizmom sa velikom ponovljivošću. Radni vek $2 \cdot 10^7$ ciklusa.



Kontaktne konfiguracije



• Contact Gap:

- H2: 0.20 mm (extra-high-sensitivity)
- H: 0.25 mm (high-sensitivity, micro voltage current load)
- G: 0.5 mm (standard)
- E: 1.8 mm (high-capacity)
- F: 1.0 mm (split-contact models)

Varijantni oblici aktuacionog mehanizma – simbolički prikaz

Pin plunger



Short hinge lever



Hinge lever



Long hinge lever



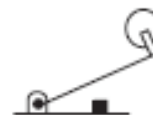
Simulated roller lever



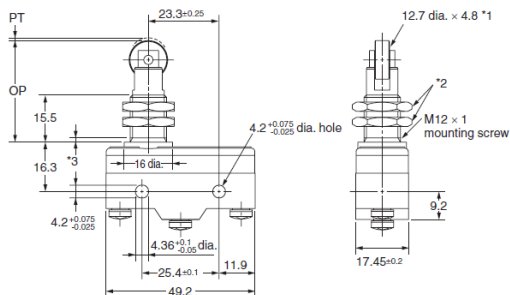
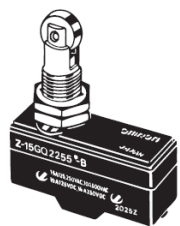
Short hinge roller lever



Hinge roller lever

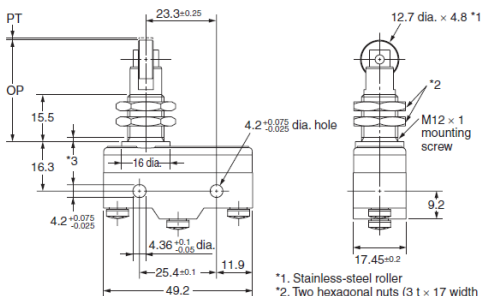
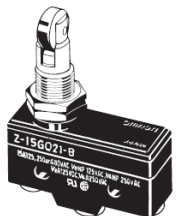


**Panel Mount Roller Plunger
Z-15GQ2255-B**



- *1. Stainless-steel roller
- *2. Two hexagonal nuts (3 t × 17 width across flats)
- *3. Incomplete screw part with a maximum length of 1.5 mm.

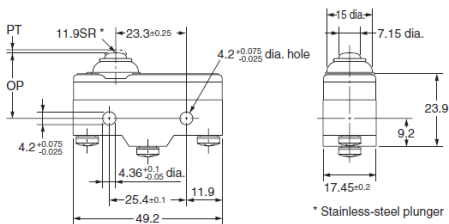
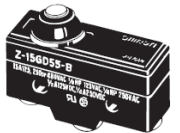
**Z-15GQ21-B Z-15EQ21-B
Z-15HQ21-B**



- *1. Stainless-steel roller
- *2. Two hexagonal nuts (3 t × 17 width across flats)
- *3. Incomplete screw part with a maximum length of 1.5 mm.

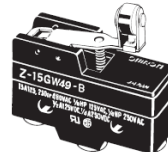
Note: Do not use the M12 mounting screw and the case mounting hole at the same time, or the case may be damaged.

**Short Spring Plunger
Z-15GD55-B
Z-01HD55-B**

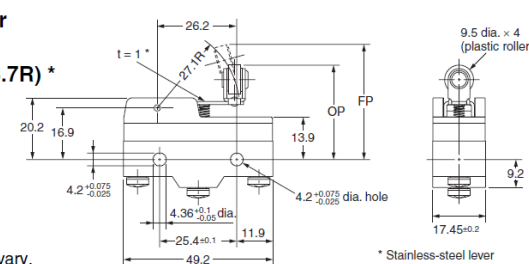


* Stainless-steel plunger

**Short Hinge Cross Roller Lever
Z-15GW49-B
Z-15GW54-B (Lever Length: 48.7R) ***

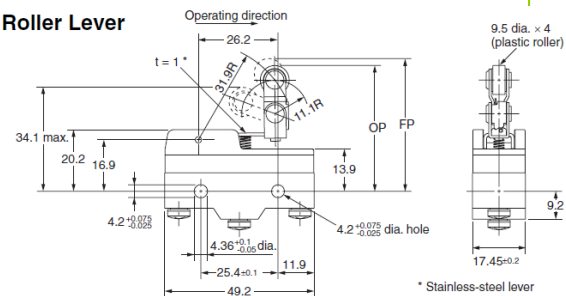
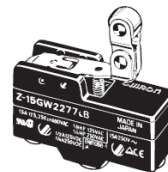


* The external dimensions of the actuator vary.



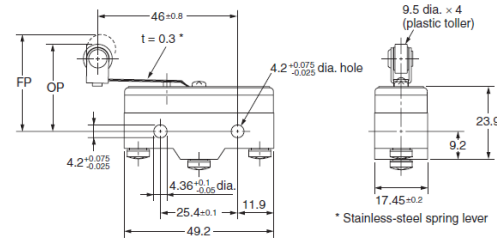
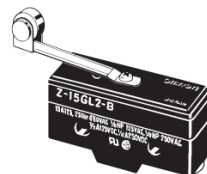
* Stainless-steel lever

**Unidirectional Short Hinge Roller Lever
Z-15GW2277-B**



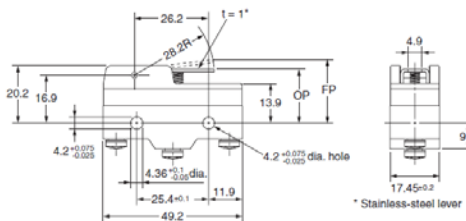
* Stainless-steel lever

**Roller Leaf Spring
Z-15GL2-B**

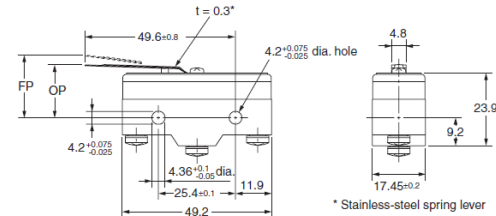
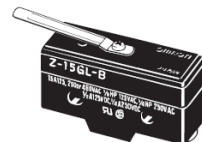


* Stainless-steel spring lever

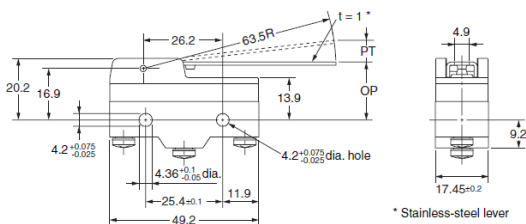
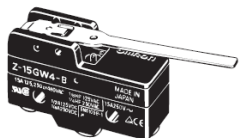
Short Hinge Lever
Z-15GW2155-B



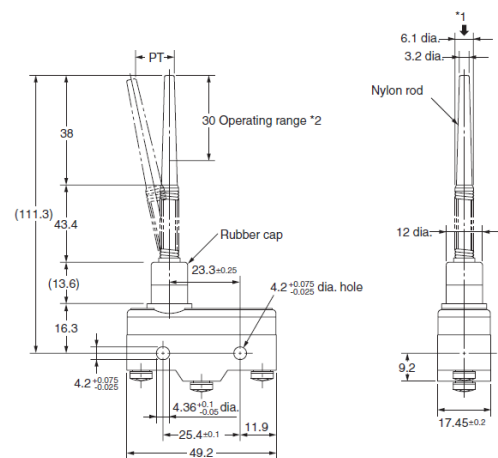
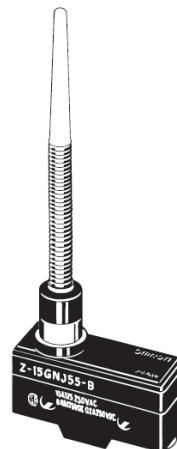
Leaf Spring
Z-15GL-B



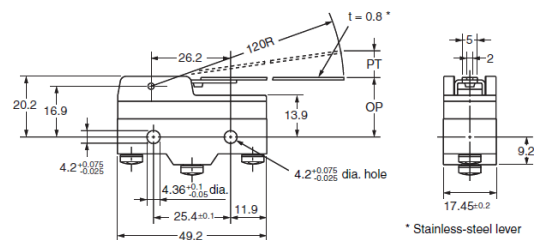
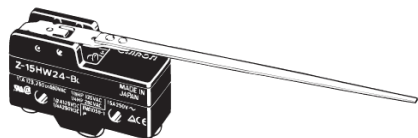
Low-force Hinge Lever
Z-15GW4-B



Flexible Rod (Coil Spring)
Z-15GNJ55-B



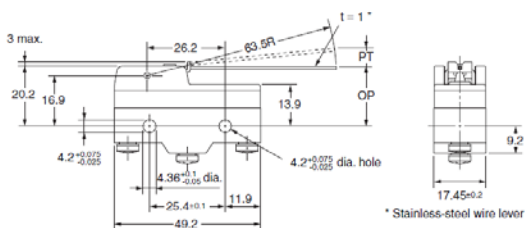
Z-15HW24-B



Low-force Wire Hinge Lever

Z-15HW52-B

Z-15HW78-B (Lever Length: 110R) *



* The external dimensions of the actuator vary.

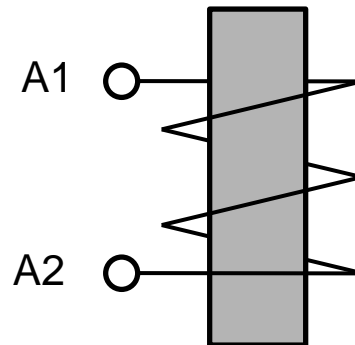
Taktilni prekidači

Primer mehaničkih prekidača koji registruju mehanički kontakt sa okruženjem. Primjenjuju se u robotici za sprečavanje kolizije robota sa okruženjem ili identifikacije prisutnosti i položaja nekog objekta u radnom prostoru robota.



Rid relej

Rid relej je jednostavan prekidački element koji se sastoji iz dva kontakta izradjena od magnetnog materijala. Kada se rid relej nadje u bliskom magnetnom polju kontakti se pomeraju i uspostavljaju električnu vezu.



Elektromagnet ili stalni magnet koji generiše magnetno polje dovoljnog intenziteta da kontakti rid releja uspostave električnu vezu.

Senzori sa diskretnim izlazom:

U ovu klasu spada jedan vrlo širok spektar senzorskih sistema kod kojih su pretvarački blok i blok za kondicioniranje izvedeni kao analogni senzorski sistem. Specifičnost je u tome što se u bloku za kondicioniranje nalazi **sklop komparatora**, ili Šmitovog okidača pomoću koga se u spoljašnji svet šalje samo informacija da je neka fizička veličina koja se registruje pretvaračem iznad ili ispod određene vrednosti. Na ovaj način analogni senzor se pretvara u diskretni senzor. Ovakav senzor nazivamo **beskontaktnim prekidačem**.

Na ovom principu se mogu realizovati beskontaktni prekidači koji se aktiviraju magnetnim poljem, optičkim signalom, pritiskom, protokom, temperaturom, praktično svim fizičkim veličinama koje su konvertovane u analogne električne signale, a zatim kolom za diskretizaciju prevedene u diskretne signale.

Induktivni beskontaktni prekidači

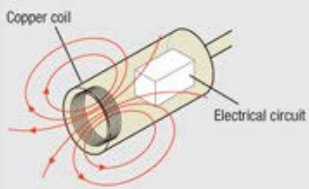
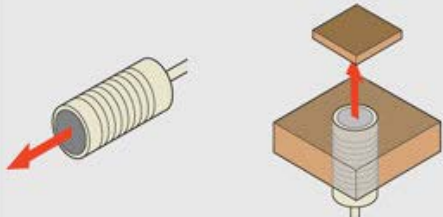
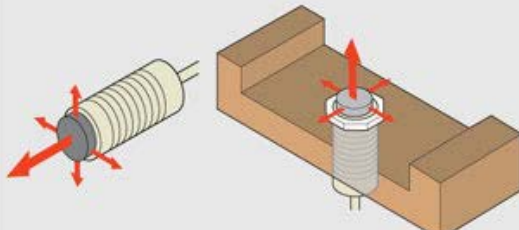
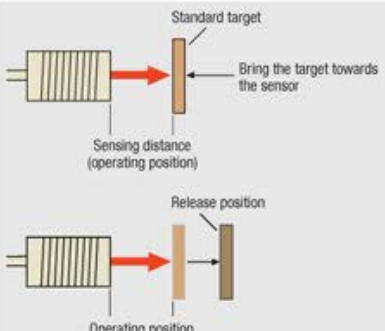
U ovom slučaju se radi o modifikaciji induktivnih senzora koji su obradjeni u okviru nastavne celine koja se odnosi na analogne senzore, koji registruju udaljenost ciljane površine nekog metalnog objekta.

Ugradnjom komparatorskog sklopa registruju se samo predmeti koji su na distanci manjoj od neke prethodno definisane vrednosti. Na ovaj način, induktivni senzor se pretvara u diskretni senzor, koji se aktivira ukoliko se metalni objekat nadje u njegovoj blizini. Ovakav senzor nazivamo beskontaktnim prekidačem ili samo senzorom prisustva.

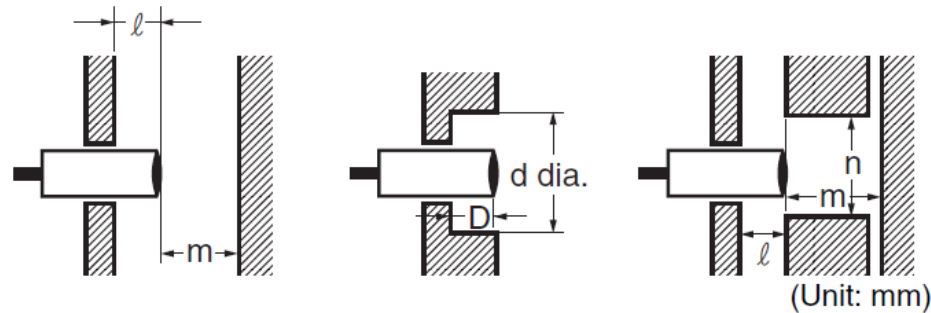
Induktivni senzori su najčešće primenjivana vrsta beskontaktnih senzora u industrijskoj praksi. Izuzetno su robusni, nemaju pokretnih delova i potpuno su imuni na sve oblike kontaminacije. Mogu da funkcionišu potopljeni u ulju, vodi, masti,

Izvide se u cilindričnom obliku, u vidu zavrtnja, koji se ugradjuje u pokretnu ili nepokretnu konstrukciju mašine. Bilo koji metalni deo mašine koji se nadje u zoni osetljivosti biće registrovan. Najčešće se primenjuje senzor nazivnog prečnika M12.



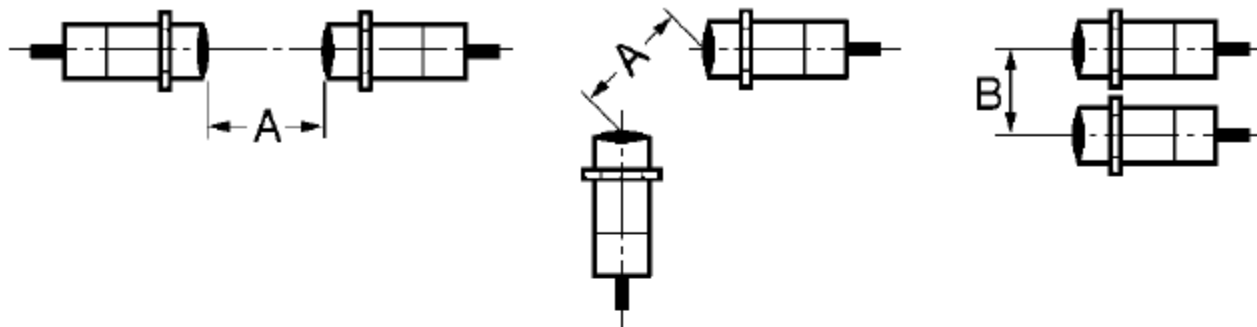
Item		
Principle of operation		<p>An inductive proximity sensor consists of a coil wound around a ferrite core at the sensing head. A high frequency is applied to this, generating an oscillating electromagnetic field around it. This is monitored by internal circuitry. When a metallic object travels toward the field, electric currents are created in the object (eddy currents). As the target approaches the sensing face these increase in size. These currents cause a transformer like effect, as a result the energy in the detecting coil lessens and the oscillations reduce. As the object moves in closer the oscillation finally stops. The monitoring circuitry detects the stopping of the oscillations and then switches the output on. The object has now been detected. Because the operating principle uses an electromagnetic field, proximity sensors excel over the likes of photoelectric sensors in environmental resistance. The likes of water, oil or dirt generally have no influence on the operation of the sensor making the use on machine tools etc. common place.</p>
Shielded sensors		<p>Shielded sensors are made with a shielding plate around the ferrite core. This has the effect of limiting the electromagnetic field to the front of the head. The sensor can be mounted flush in metal surfaces. This gives the advantage of mechanical protection, along with sensing directly adjacent to the sensing face. This limits the sensing range, but the sensor can be mounted with ease with surrounding metals taking no effect.</p>
Unshielded sensors		<p>Unlike the shielded sensor there is no shielding around the ferrite core. This gives a greater sensing range than the equivalent diameter shielded proximity sensor. For the same diameter the range is generally doubled. As the field extends to the side of the proximity switch it can be influenced by metals in this area. Thus it cannot be flush mounted and requires more distance to other proximity sensors or metal parts.</p>
Sensing distance		<p>The sensing distances quoted in the specifications for the proximity sensors are based on a standard target. This target (known as a standard object) is a square plate of mild steel 1 mm thick, a primarily ferrous object. When the target reaches the point where the sensor operates, this is the sensing distance. The sensor will release (i.e. turn off) at a point lightly further from the sensing face (hysteresis).</p>

Induktivni senzori se izvode u dva osnovna oblika: oklopljeni i neoklopljeni. Kod oklopljenih senzora solenoid koji se nalazi na vrhu senzora je bočno obavijen metalnim prstenom tela senzora, čime se magnetno polje usmerava na čeonu stranu, što pojednostavljuje ugradnju, ali istovremeno i smanjuje osetljivost. Uslovi ugradnje ova dva tipa induktivnih senzora navedeni su u tabeli ispod.



Type	Dimension	M8	M12	M18	M30	
					Short barrel	Long barrel
Shielded	l	0	0	0 (See note 1.)	0 (See note 2.)	
	m	4.5	12	24	45	
	d	---	---	27	45	
	D	0	0	1.5	4	
	n	12	18	27	45	
Non-shielded	l	12	15	22	30	40
	m	8	20	48	70	90
	d	24	40	70	90	120
	D	12	15	22	30	40
	n	24	40	70	90	120

Pored uticaja okolnih metalnih površina, kod ugradnje treba uzeti u obzir medjusobni uticaj magnetnih polja ukoliko se dva ili više senzora nalaze u neposrednoj blizini. Navedena tabela daje osnovna ograničenja po ovom osnovu.

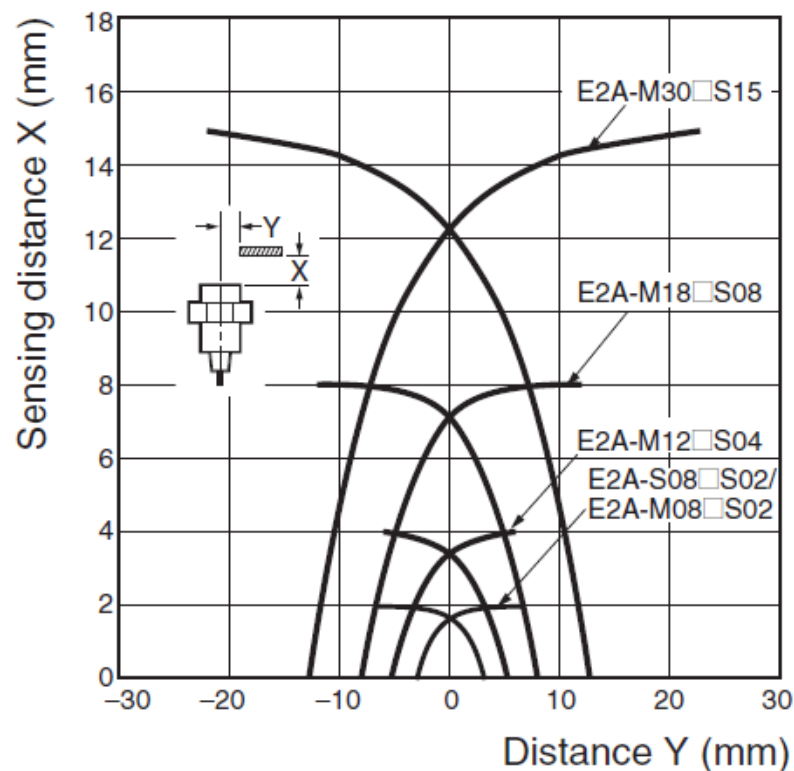


(Unit: mm)

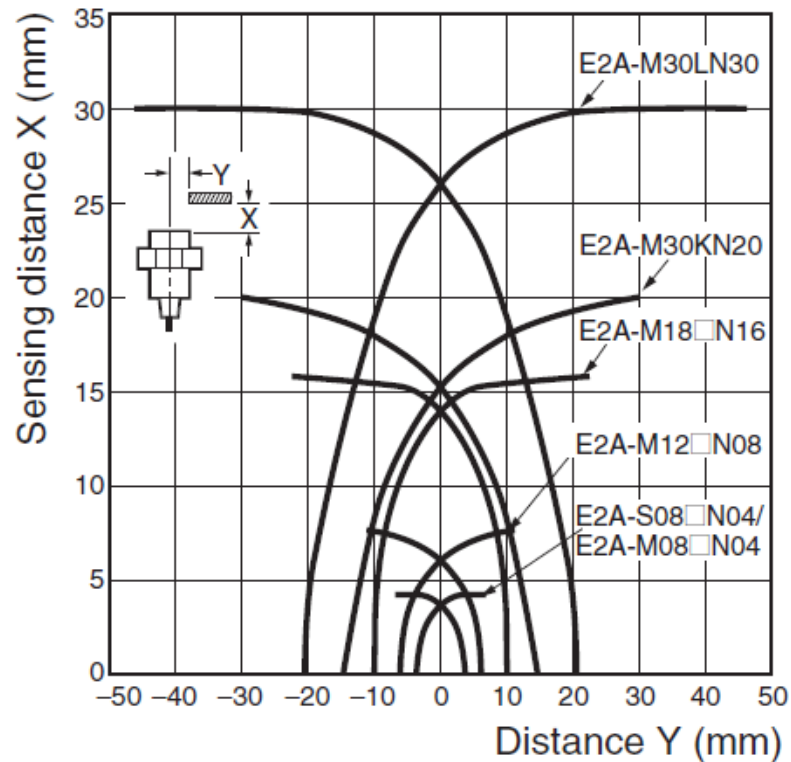
Type	Dimension	M8	M12	M18	M30	
					Short barrel	Long barrel
Shielded	A	20	30	60	110	
	B	15	20	35	70	
Non-shielded	A	80	120	200	300	300
	B	60	100	120	200	300

Osetljivost senzora na prisustvo metalne mete zavisi od njegovog nominalnog prečnika, odnosno od prečnika solenoida i intenziteta magnetnog polja koje on emituje u okolni prostor. Granične krive su paraboličnog oblika i formiraju parabolični konus u odnosu na glavnu osu senzora. Standardna meta izradjena je od mekog čelika, ima kvadratni oblik čija stranica zavisi od prečnika tela senzora i debljine 1 mm (za slučaj oklopljenog senzora M12 mere mete su: 12x12x1mm).

Shielded Models

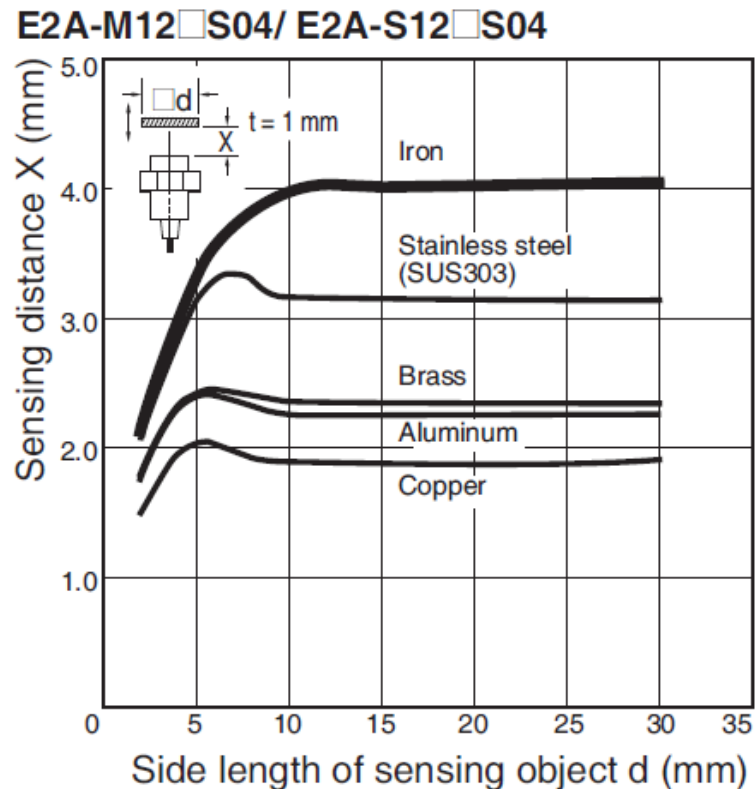


Non-shielded Models



Osetljivost senzora uslovljena je vrstom materijala. Uticaj vrste materijala prikazan je na dijagramu ispod i ogleda se u redukciji distance na kojoj senzor može da registruje prisustvo standardne mete.

Trajanje ciklusa uključivanja i isključivanja senzora zavisi od njegovog nominalnog prečnika. Za senzor prečnika M12 jedna kompletna sekvenca uključivanja i isključivanje iznosi 1 msec, odnosno senzor može da radi sa 1 kHz frekvencijom.



Item

Output and Connection

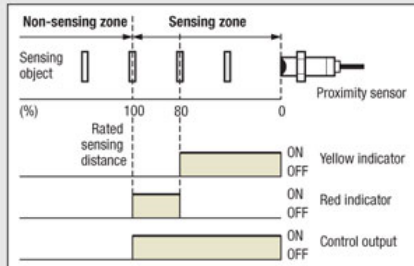
For the output mode NO (normally open) the control output is OFF if no object is present.

For the output mode NC (normally closed) the control output is ON if no object is present.

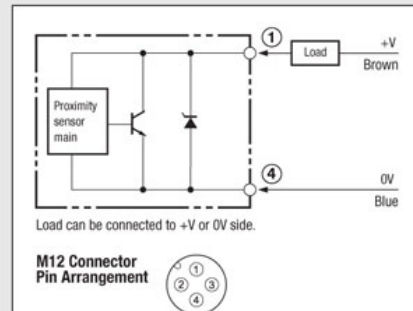
For the output mode NO+NC (antivalent) the NO output is OFF and the NC output is ON if no object is present.

DC 2-wire

Timing chart for NO (normally open)

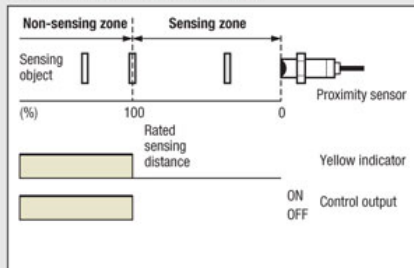


Output circuit

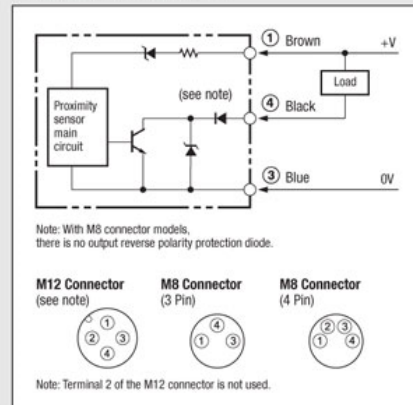


DC 3-wire

Timing chart for NC (normally closed)

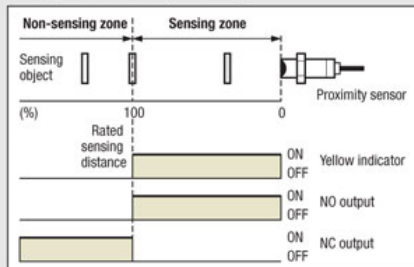


Output circuit (example for NPN)

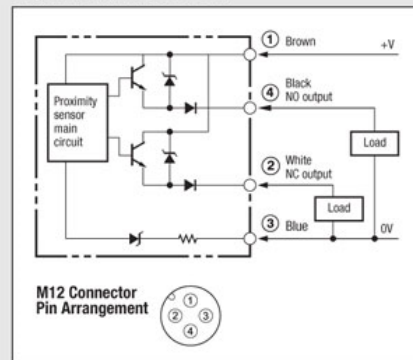


DC 4-wire

Timing chart for NO+NC (antivalent)



Output circuit (example for PNP)



Optički beskontaktni prekidači

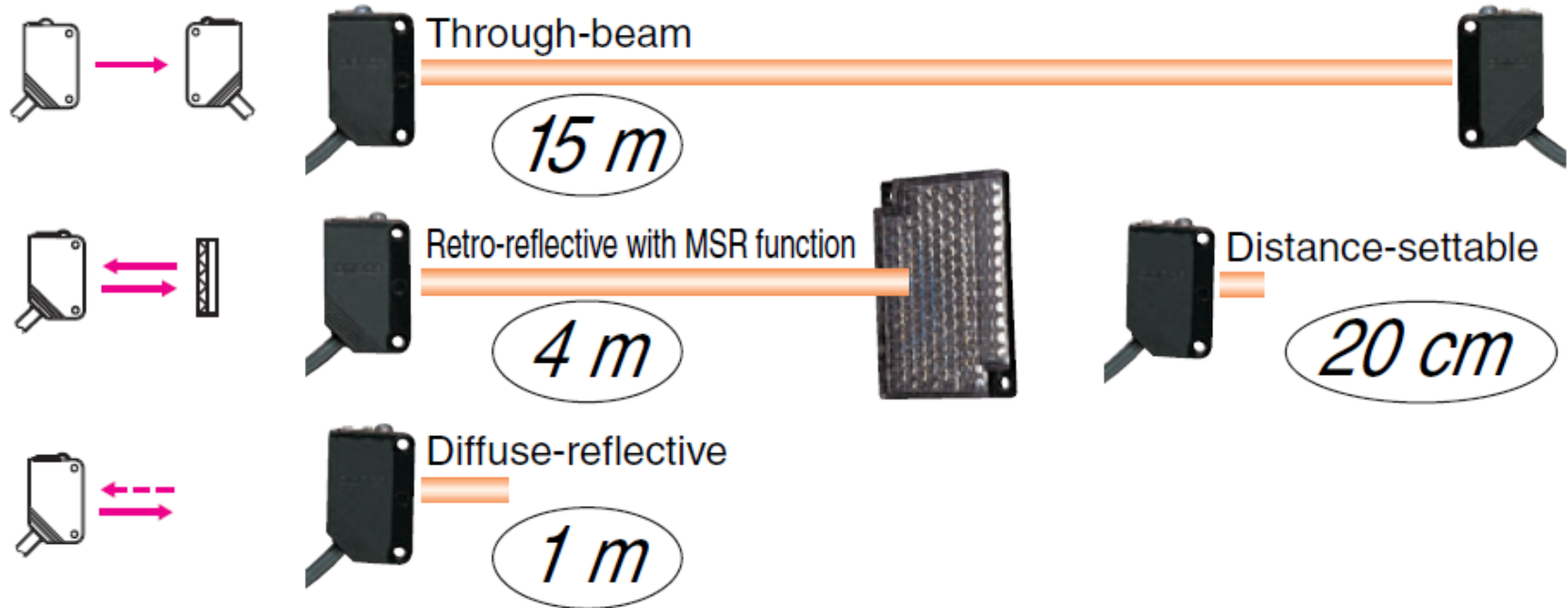
U ovom slučaju se koristi fotoelektrični efekat poluprovodnika za generisanje informacije o prisutnosti nekog objekta u određenom prostoru.

Optički senzor se uvek sastoji iz emitera, odnosno izvora svetlosti i prijemnika u kome se svetlosna pobuda prevodi u električni signal, koji se dalje primenom komparatora ili Šmitovog okidača prevodi u dva diskretna stanja prekidačkog tipa.



U zavisnosti od načina kako se emituje i prima svetlosni snop postoje tri vrste optičkih prekidača:

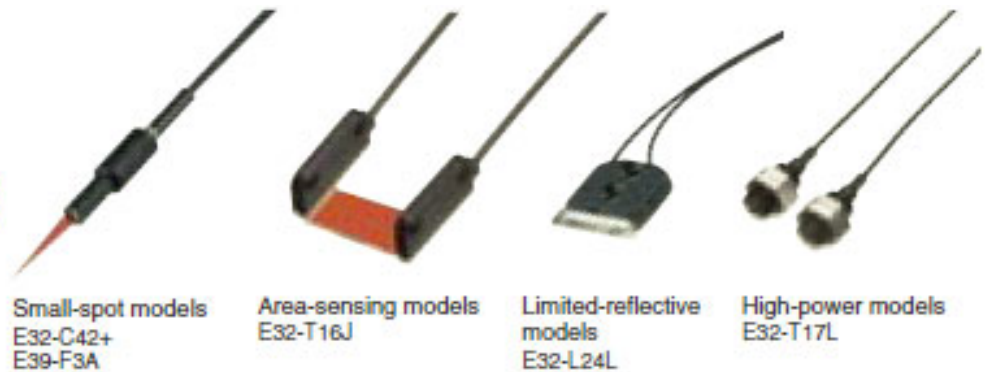
1. Optički prekidači sa presecanjem svetlosnog zraka – transmisivni (*through beam*),
2. Optički prekidači sa spekularnom refleksijom emitovanog svetlosnog zraka (*retro-reflective*), i
3. Optički prekidači sa difuznom refleksijom emitovanog svetlosnog zraka (*diffuse-reflective*).



Optički senzori dobijaju na značaju ukoliko se iskoriste optički svetlo vodi koji se izvode primenom optičkih vlakana. Na ovaj način moguća je minijaturizacija i ugradnja senzora u ekstremno ograničen prostor. Primenom različitih difuzora i optičkih elemenata (sočiva), moguće je formirati tačkasti snop izuzetno malih dimenzija ili optičku zavesu, korišćenjem cilindričnog sočiva koje tačkasti izvor svetlosti prevodi u linijski.



- Resistant to dust and dirt
 - Capable of detecting small workpieces
 - Resistant to workpiece vibration
- Use these models to handle unstable detection conditions.

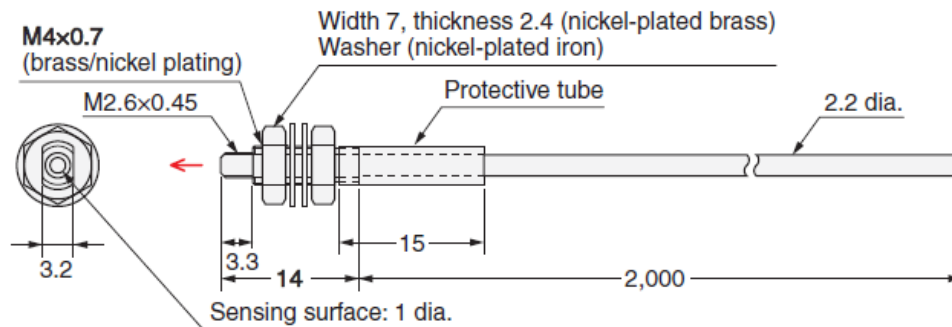


Primer nekih od standardnih oblika sonde sa optičkim vlaknima. Dimenzije su minijaturene a rezolucija kod pojedinih modela značajno ispod 1 mm, što omogućava rad sa najsitnijim detaljima i njihovo precizno prepoznavanje u vrlo kratkom vremenskom intervalu koji se meri milisekundama.

Simbioza optike i elektronike kroz različite forme analognih i digitalnih senzorskih sistema otvorila je jedan širok istraživačko razvojni prostor koji se naziva optronika i koji je sastavni deo mehatronike.

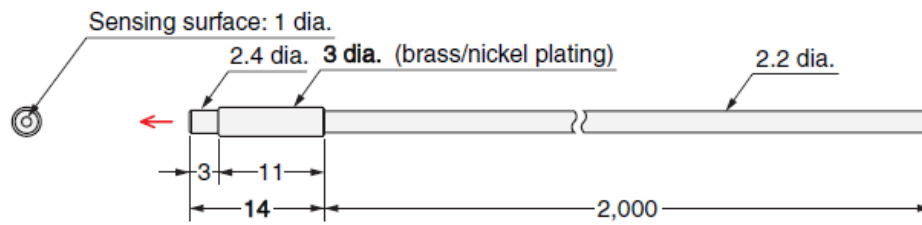
E32-T11 **B**
E32-T11U **U**

Free-cut



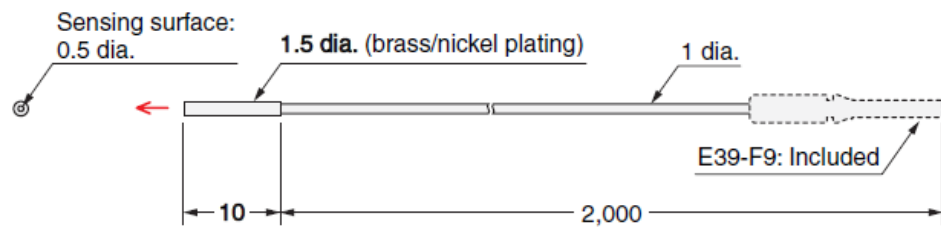
E32-T12B **B**

Free-cut



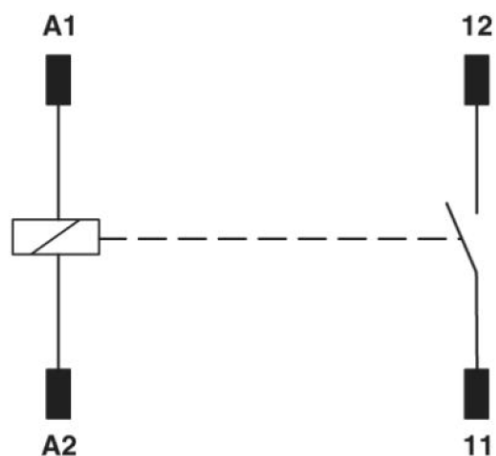
E32-T22B **B**

Free-cut



Elektromagnetni releji

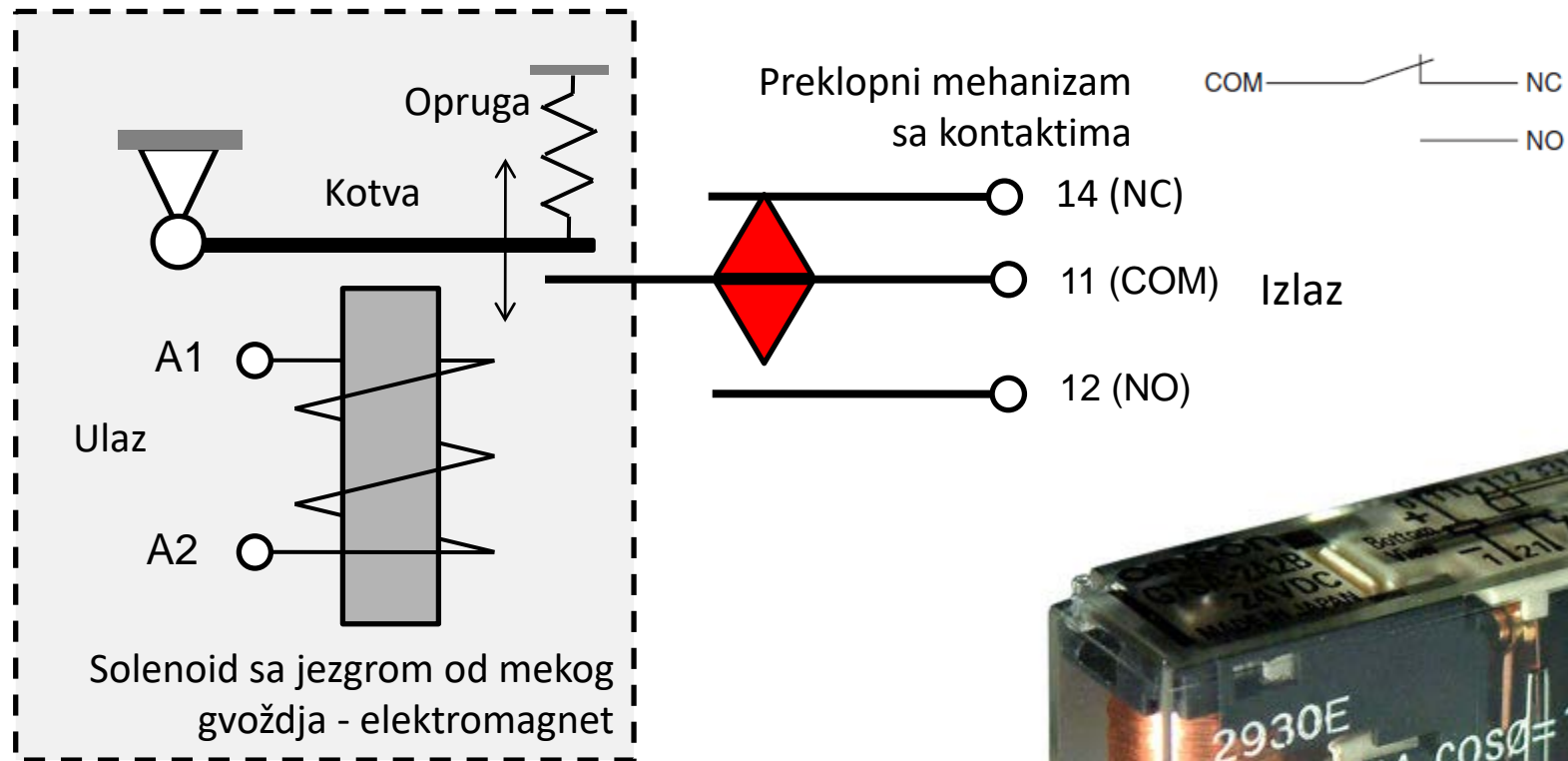
Elektromagnetni relej je mehanički prekidač koji je aktuiran elektromagnetnim mehanizmom. Preklopni sklop prekidača se po pravilu izvodi kao monostabilni preklopnik sa različitim konfiguracijama kontakata. Aktuacioni sklop se izvodi pomoću solenoida koji privlači kotvu izradjenu od čelika dobrih feromagnetnih svojstava. Ovako generisano kretanje kotve dalje se koristi za aktivaciju preklopnog mehanizma. Prekidač u formi elektromagnetnog releja je vrlo pogodan za primenu u gradnji mehatronskih sistema, zato što se električni izlazni signal koji generiše mikrokontroler direktno, ili indirektno preko nekog pojačavačkog medjusklopa izvedenog primenom poluprovodnika, koristi za aktivaciju solenoida releja.



Elektromagnetni relej ima dve vrlo značajne osobine: 1)galvanska izolacija upravljačkog sistema od sistema aktuatora i 2)pojačavanje komandnih signala upravljačkog sistema, sa praktično neograničenim energetske limitima.

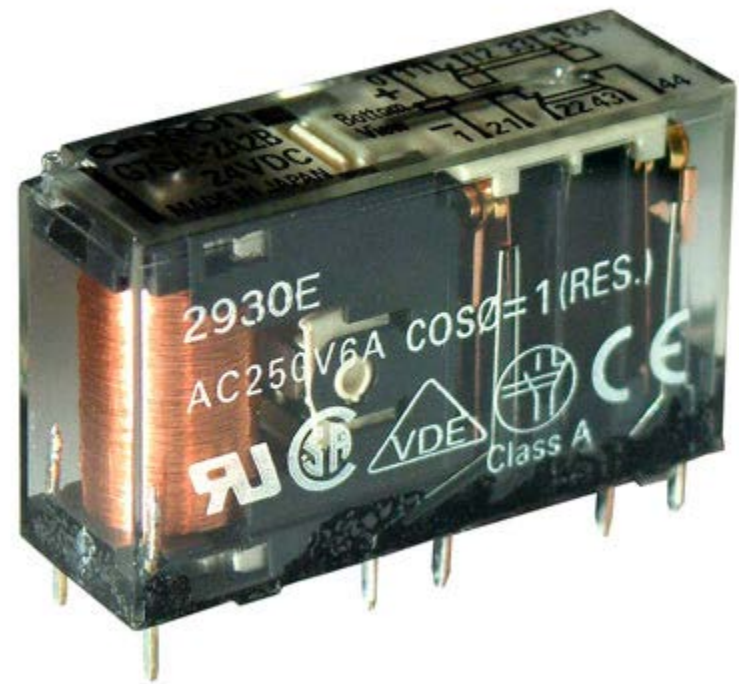
Električna šema je prikazana na priloženoj slici. Uočavaju se dva upravljačka priključna terminala A1 i A2, preko kojih se pobudjuje solenoid. Aktuator se priključuje na izlazne terminale označene sa 11 i 12 koji su povezani sa kontaktima preklopnog mehanizma prekidača koji je mehanički pogonjen poteznim mehanizmom koji je povezan sa kotvom solenoida. Ova veza je označena isprekidanom linijom.

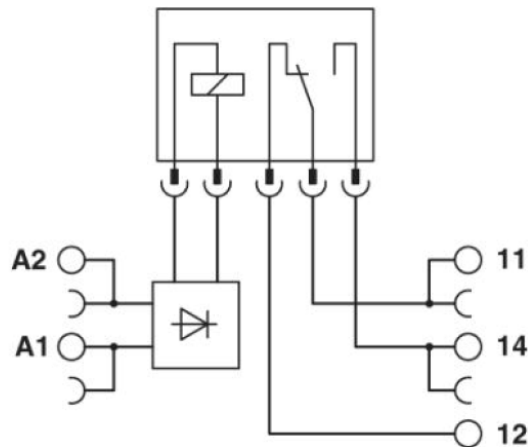
Šematski prikaz konstrukcije elektromagnetnog releja:



Monostabilni elektromagnetni aktuacioni sistem

Vreme mehaničkog odziva releja je reda veličine 5 do 50 ms, pri čemu postoji asimetrija kod privlačenja i otpuštanja kotve. Otpuštanje kotve je uvek značajno sporije.

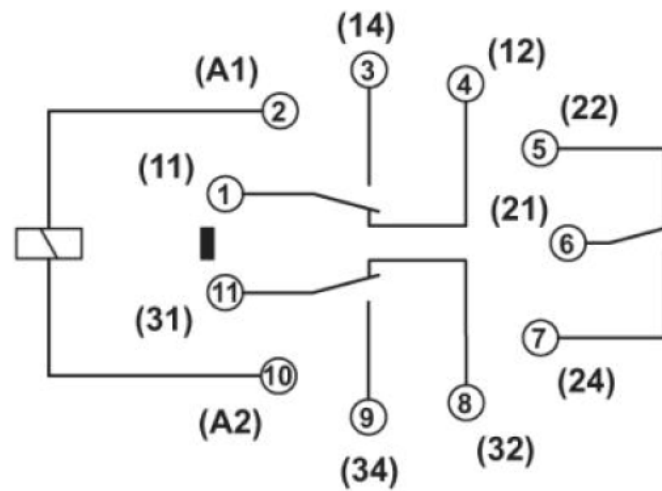




Primer elektromehaničkog releja koji se koristi kao interfejs programabilnog automata za vezu sa različitim vrstama aktuatora. U osnovi ovo je zaštitni relej koji galvanski odvaja osetljiv upravljački sklop od robusnih objekata povezanih na njegovoj periferiji. Ovakav sistem interfejsa je industrijski standard i sastoji se iz kućišta na kome se nalaze priključni kontakti i modula releja koji je brzo izmenljiv. Na kućištu se nalazi LED dioda za signalizaciju statusa releja.

Primer višepolnog releja za aktivaciju većeg broja potrošača, višefaznih aktuatora ili rastavljanje i spajanje kola sa višepolnim vezama.

Sklop releja



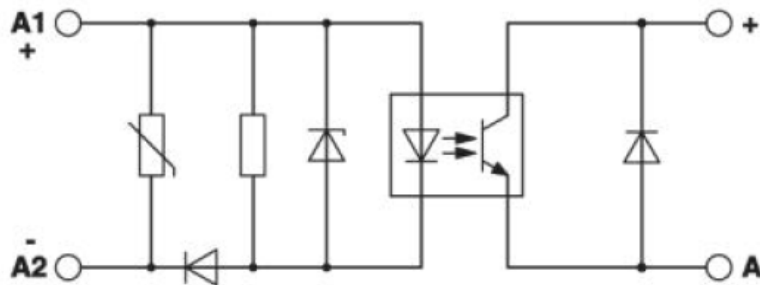
Električna šema

Podnožje



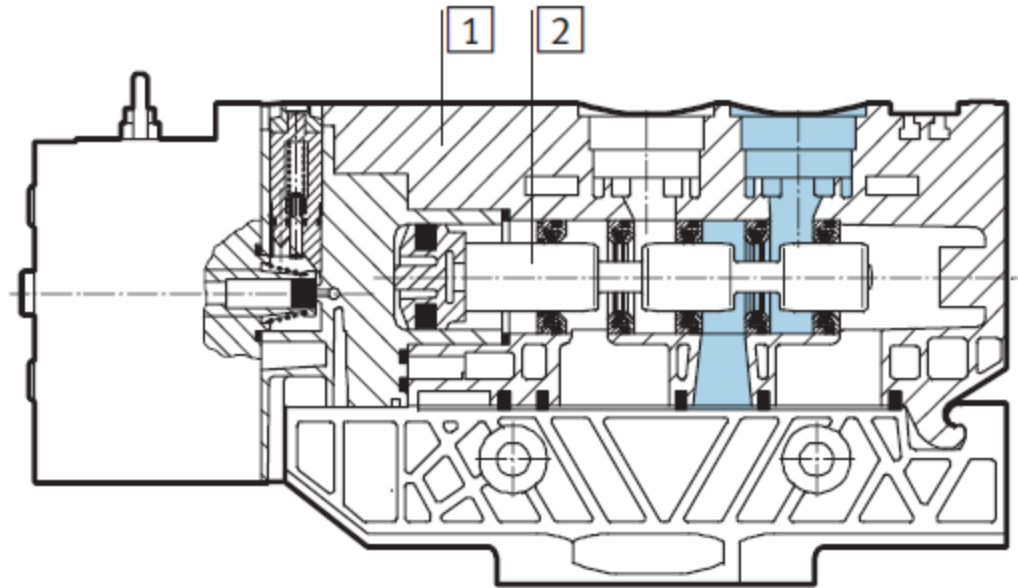
Poluprovodnički relej (Solid state relay)

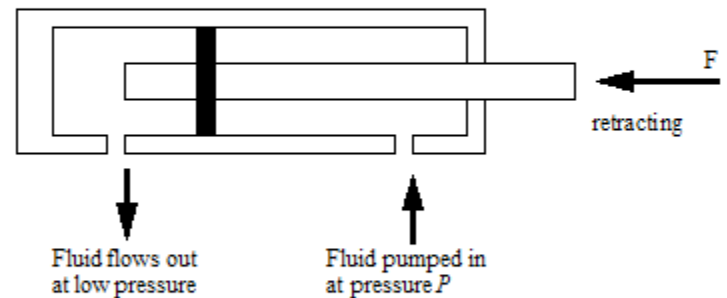
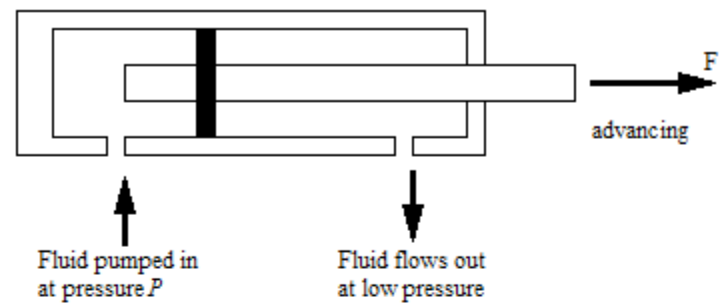
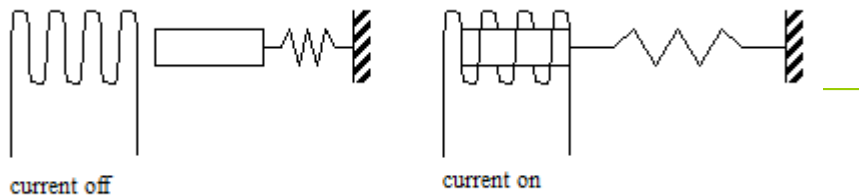
Umesto mehaničkog sistema aktucije mehaničkih kontakata, može se ista funkcija ostvariti primenom poluprovodnika velike snage. Ulazno kolo je galvanski odvojeno od izlaznog kola, ugradnjom para optički spregnutih poluprovodničkih elemenata – foto dioda i fototranzistor. Releji ovog tipa imaju mnogo bržu reakciju, pa se njegovo vreme odziva meri delovima milisekunde ili milisekundama. Takođe, odsustvo mehaničkih kontakata eliminiše problem mehaničkih otkaza. Za razliku od mehaničkog releja, poluprovodnički relej ne može u potpunosti da galvanski razdvoji izlazne kontakte, što u određenim situacijama predstavlja problem.



Električna pobuda pneumatskog ili hidrauličkih ventila

Sila koju generiše solenoid može se po analogiji sa elektromagnetnim relejom iskoristiti za aktuiranje pneumatskih i hidrauličkih razvodnika. Ovako aktuirane elemente za regulaciju toka fluida nazivamo elektromagnetnim razvodnicima. U slučaju malih nazivnih dimenzija razvodnika akcija se izvodi direktno, dok se kod većih nazivnih mera elektromagnetom pogoni **pilot ventil**, koji dalje pojačava akciju silu i tako omogućava pogonjenje velikih razvodnih ventila.



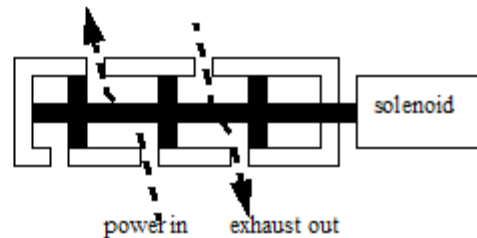
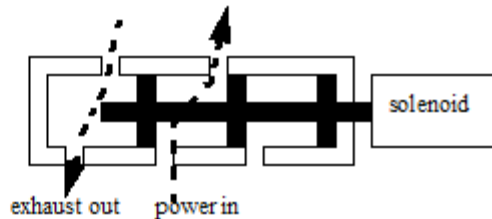
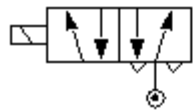


For Force:

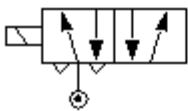
$$P = \frac{F}{A} \quad F = PA$$

where,

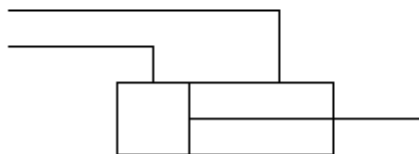
P = the pressure of the hydraulic fluid
 A = the area of the piston
 F = the force available from the piston rod



The solenoid has two positions and when actuated will change the direction that fluid flows to the device. The symbols shown here are commonly used to represent this type of valve.



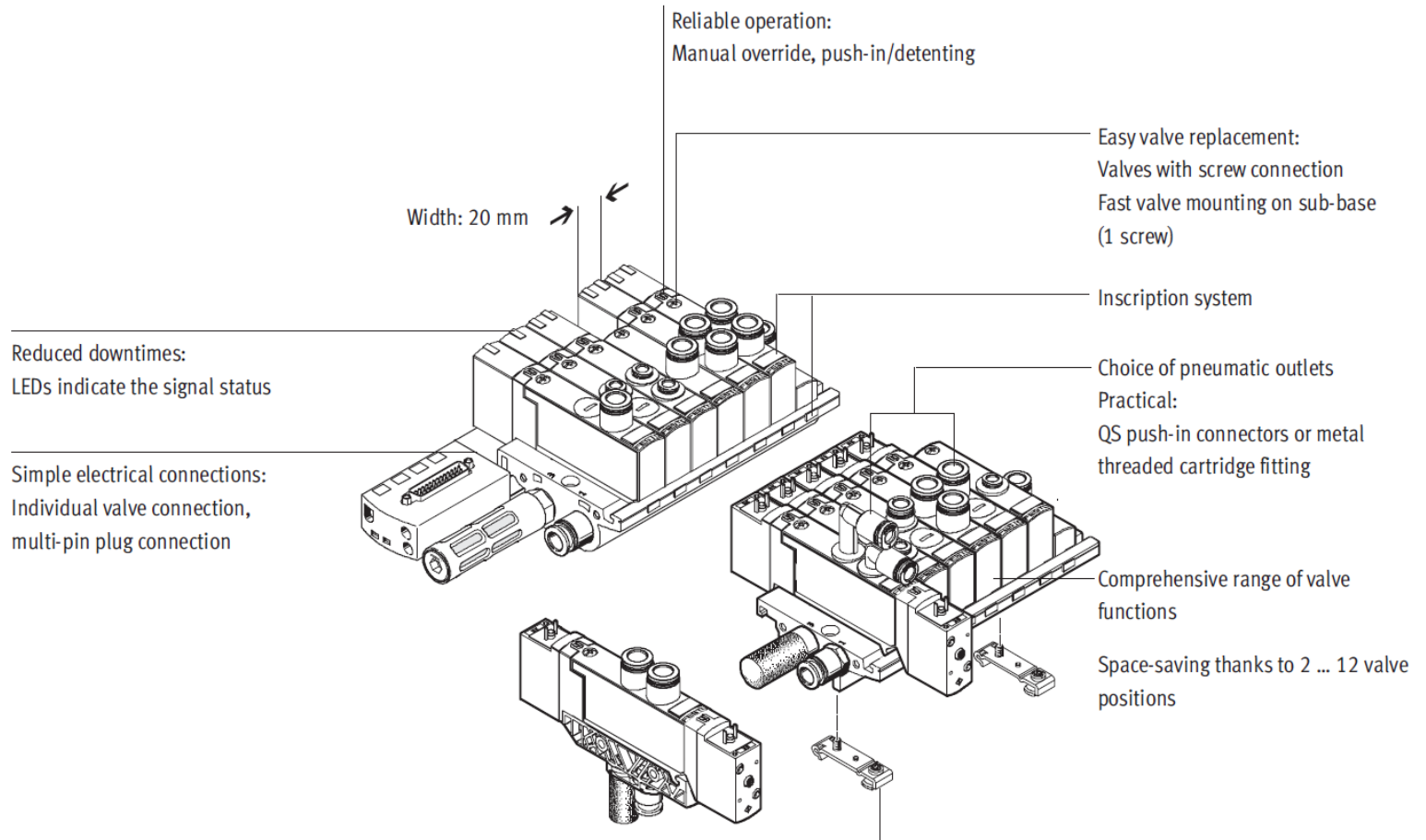
single acting spring return cylinder



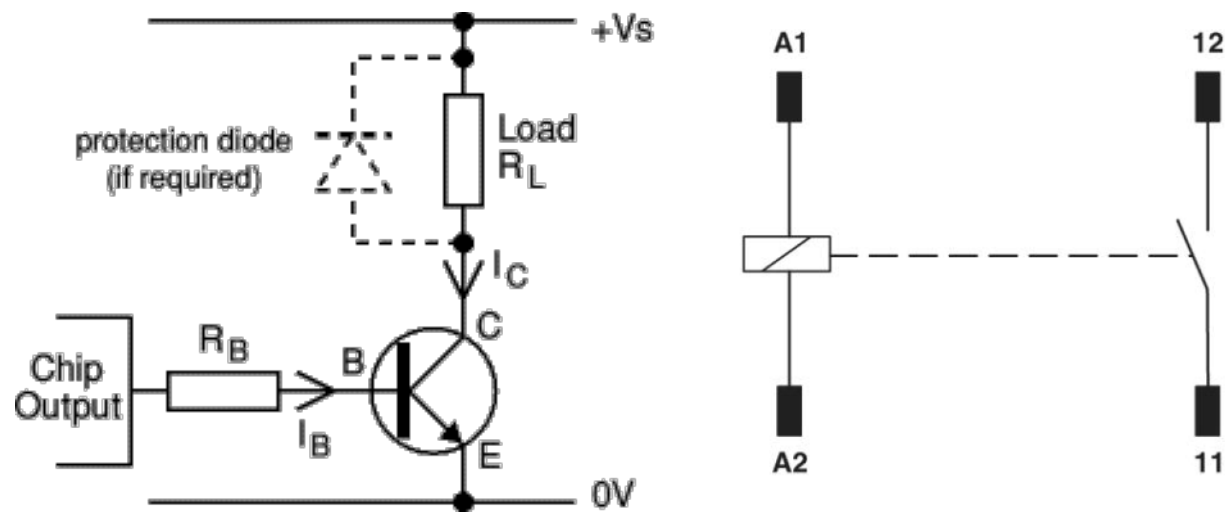
double acting cylinder

Pneumatsko ventilsko ostrvo

Mehatronske sklop koji danas predstavlja industrijski standard u domenu pneumatskih upravljačkih i akcionih sistema. Elektromagnetna akcija razvodnika omogućava precizno i efektivno upravljanje funkcijom pneumatske instalacije. Električni i pneumatski signali se agregiraju i time se pojednostavljuje instalacija i održavanje.



Tipična konfiguracija izlaznog kanala upravljačkog sistema za pobudu solenoida releja. Izlazni tranzistor treba da bude tako dimenzionisan da obezbedi dovoljnu struju za napajanje solenoida. Proizvođači releja uvek specificiraju nominalni napon, najčešće je to 24 V DC/AC ili 240 VAC, i struju koju povlači namotaj releja. Ta struja se kreće u intervalu od nekoliko miliampera za male releje, pa do nekoliko desetina ampera u slučaju releja sa glomaznim mehanizmom sklopa preklopnika.



ENKODER

Enkoderi predstavljaju jednu široku klasu digitalnih senzorskih sistema koji se koriste za merenja linijskih i ugaonih pomeraja. Već iz samog naziva se vidi da se radi o čisto digitalnim sistemima, koji kodiraju (engleski *encoding*) ugaonu ili linijsku poziciju, korišćenjem odgovarajućih elektromehaničkih sklopova, koji će biti razmatrani u okviru ove nastavne celine.

Generalno, enkoderi se klasifikuju u dve velike grupe:

1. Inkrementalni enkoderi, i
2. Apsolutni enkoderi.

Inkrementalni enkoderi mere relativni položaj u odnosu na neku unapred poznatu inicijalnu koordinatu (ugaonu ili linijsku). Apsolutni enkoderi mere apsolutnu poziciju, koja je definisana konstruktivnim rešenjem sklopa u okviru koga funkcionišu.

Pored enkodera, u praksi se još primenjuju obrtni davači koji se nazivaju rizolveri. Rizolveri su davači analognog tipa.



Merenje brzine:

Diferenciranjem signala koji generiše enekoder, odnosno deljenjem ugaonog ili linijskog inkrementa sa vremenom koje je proteklo za njegovo izvršenje, dobija se informacija o tekućoj brzini.

Za ove nemene se još koriste uređaji koji se nazivaju tahogeneratori, koji su kao i rizolveri analogni uređaji.

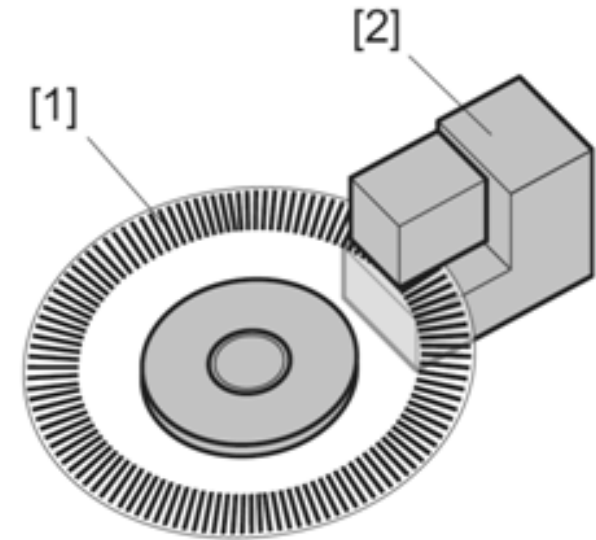
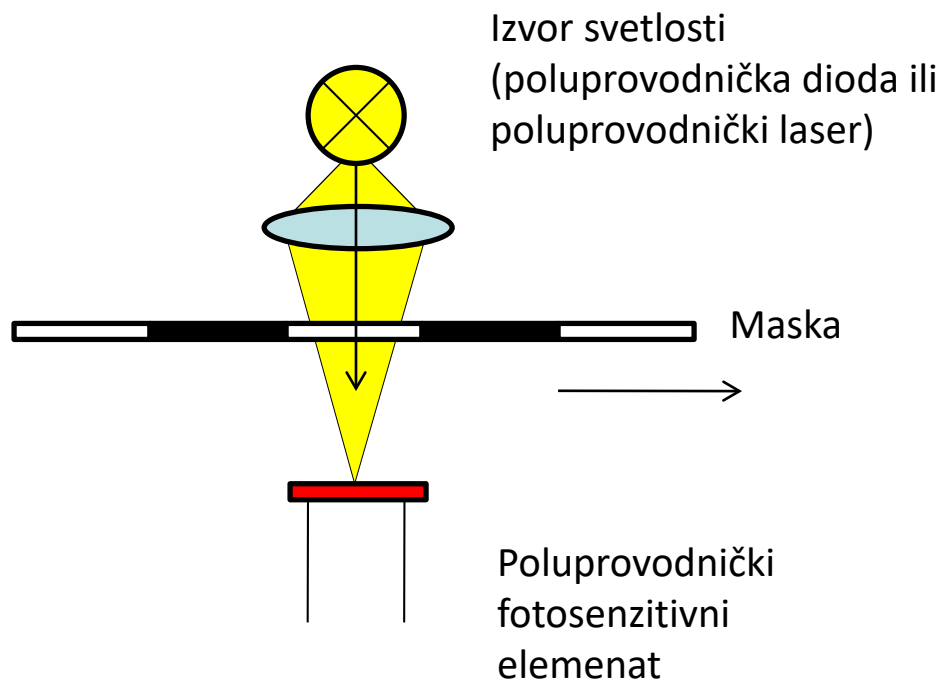
Tačnost i prilagodljivost: Zbog svog specifičnog konstrukcionog oblika, enkoderi nemaju osobinu nagomilavanja greške, i takodje, njihova tačnost nije uslovljena veličinom mernog opsega (maksimalni ugaoni ili linijski pomeraj), što je od posebnog praktičnog značaja. Alternativni analogni sistemi nemaju ovo svojstvo, tako da u savremenim servoregulacionim mehatronskim sklopovima, počev od mašina alatki, robota, pa do lansera raketa, digitalni enkoderi predstavljaju nezamenljivu komponentu. Različita konstrukciona rešenja omogućavaju veliku fleksibilnost u primeni, u smislu mogućnosti ugradnje u vrlo različitim konstrukcijama.



Konstrukcija:

Enkoderi se najčešće izvode korišćenjem optičkih i magnetnih elektromehaničkih pretvarača. Dominantna tehnologija u savremenoj industrijskoj praksi je bazirana na optoelektronskim pretvaračima.

Optički enkoderi poseduju optičke elemente, foto diode i foto tranzistore, od kojih je jedan izvor a drugi prijemnik. Pored optičkih elemenata enkoder sadrži i masku na kojoj se nalaze prozirna i neprozirna polja. Ova polja naizmenično prekidaju optički put izmedju izvora i prijemnika. Veličina ovih polja je u direktnoj srazmeri sa mehaničkom rezolucijom enkodera.



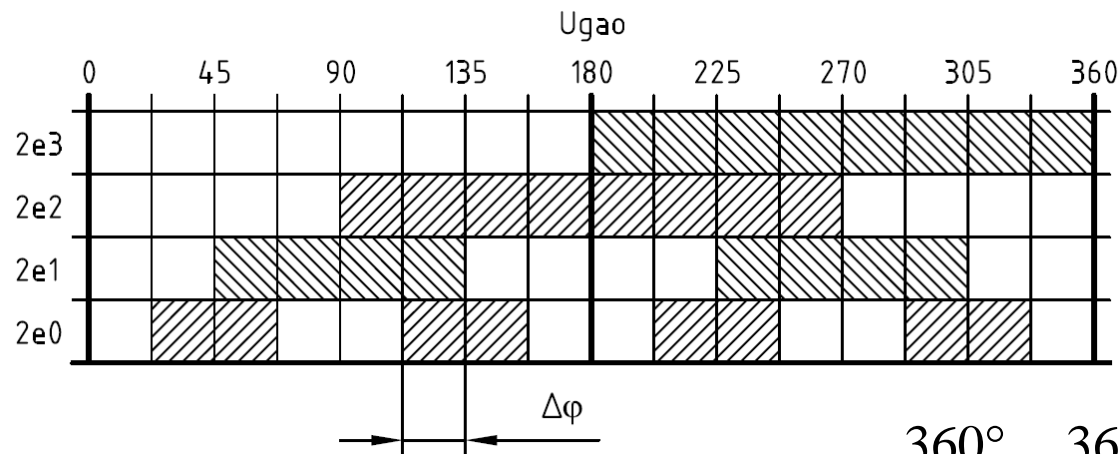
- 1 Optička maska
- 2 Sklop izvora i prijemnika

Apsolutni enkoder

Apsolutni enkoder poseduje n paralelnih kanala koji generišu odgovarajući binarni kod povezan sa nekom geometrijskom razmerom. Ukoliko se radi o merenju ugaonog pomeraja, onda se kodiraju ugaoni inkrementi.

Kodiranje se po pravilu izvodi Gray-ovim binarnim kodom u cilju razrešavanje problema stabilnosti očitavanja.

Navodi se primer obrtnog enkodera kod koga je ugaona pozicija kodirana sa **4 binarna kanala**. Zbog jednostavnosti ugaoni zapis je prikazan u ortogonalnim pravolinijskim koordinatama. Sa četiri binarna kanala moguće je kodirati $2^4 = 16$ pozicija, što znači da je ugaona rezolucija ovog enkodera 22.5 deg .



$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{2^n} = \frac{360}{16} = 22.5^\circ$$

Primena Gray-ovog cikličnog koda ima vrlo veliki praktični značaj zato što za razliku od prirodnog binarnog koda kod ovog koda decimalno susedni kodovi su istovremeno i logički susedni, odnosno razlikuju se samo na jednoj kodnoj poziciji. Ipak, primena apsolutnog enkodera koji generiše Gray-ov kod na svom izlazu ne isključuje primenu prirodnog binarnog koda u njegovom okruženju. Zato je neophodno realizovati konvertor Gray-ovog u binarni kod i obrnuto.

DE	ULAZ				IZLAZ			
	Gray				8421 kod			
	G3	G2	G1	G0	B3	B2	B1	B0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	1	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0	0	1	1
4	0	1	1	0	0	1	0	0
5	0	1	1	1	0	1	0	1
6	0	1	0	1	0	1	1	0
7	0	1	0	0	0	1	1	1
8	1	1	0	0	1	0	0	0
9	1	1	0	1	1	0	0	1
10	1	1	1	1	1	0	1	0
11	1	1	1	0	1	0	1	1
12	1	0	1	0	1	1	0	0
13	1	0	1	1	1	1	0	1
14	1	0	0	1	1	1	1	0
15	1	0	0	0	1	1	1	1

$$B_0 = \sum(1,2,5,6,9,10,13,14)$$

$$B_1 = \sum(2,3,4,5,10,11,12,13)$$

$$B_2 = \sum(4,5,6,7,8,9,10,11)$$

$$B_3 = \sum(8,9,10,11,12,13,14,15)$$

Minimizacijom i primenom Ex-III operatora, sledi:

$$B_0 = G_0$$

$$B_1 = G_0 \oplus G_1 = B_0 \oplus G_1$$

$$B_2 = (G_0 \oplus G_1) \oplus G_2 = B_1 \oplus G_2$$

$$B_3 = ((G_0 \oplus G_1) \oplus G_2) \oplus G_3 = B_2 \oplus G_3$$

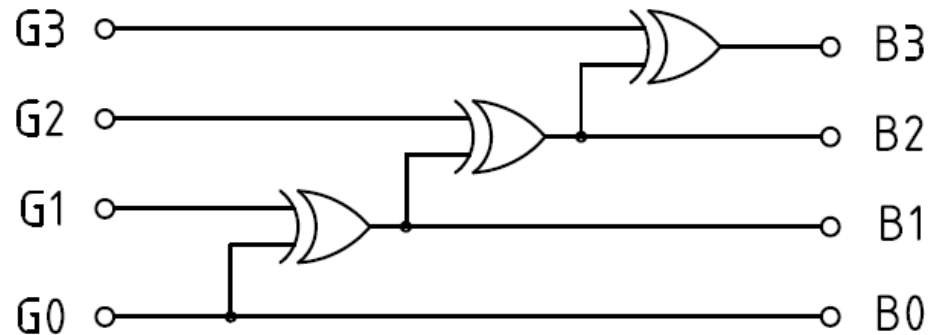
Iz navedenog skupa minimiziranih logičkih jednačina koje predstavljaju analitičku formulaciju kombinacione mreže konvertora koji prevodi Gray-ov u prirodni binarni kod:

$$B_0 = G_0$$

$$B_1 = B_0 \oplus G_1$$

$$B_2 = B_1 \oplus G_2$$

$$B_3 = B_2 \oplus G_3$$



Analogno, ova mreža se dalje kaskadno proširuje za konvertore sa većim brojem senzorskih kanala.

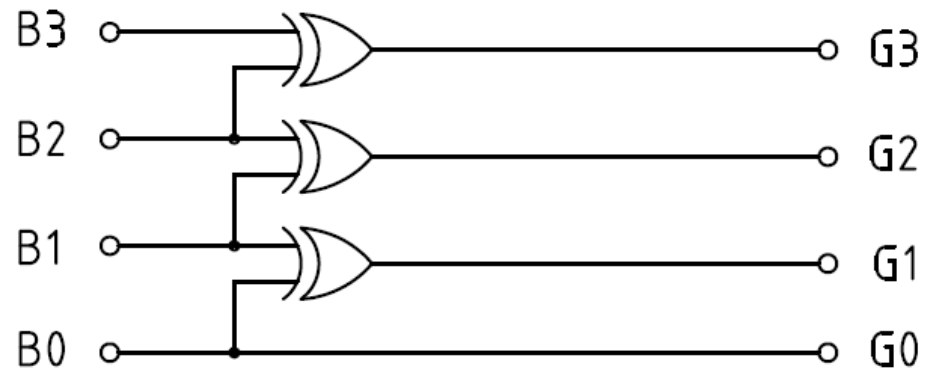
Konvertor prirodnog binarnog koda u ekvivalentni Gray-ov kod:

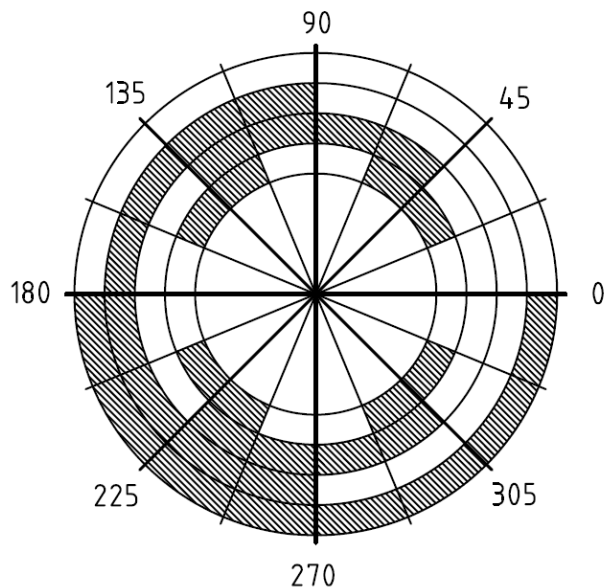
$$G_0 = B_0$$

$$G_1 = B_0 \oplus B_1$$

$$G_2 = B_1 \oplus B_2$$

$$G_3 = B_2 \oplus B_3$$





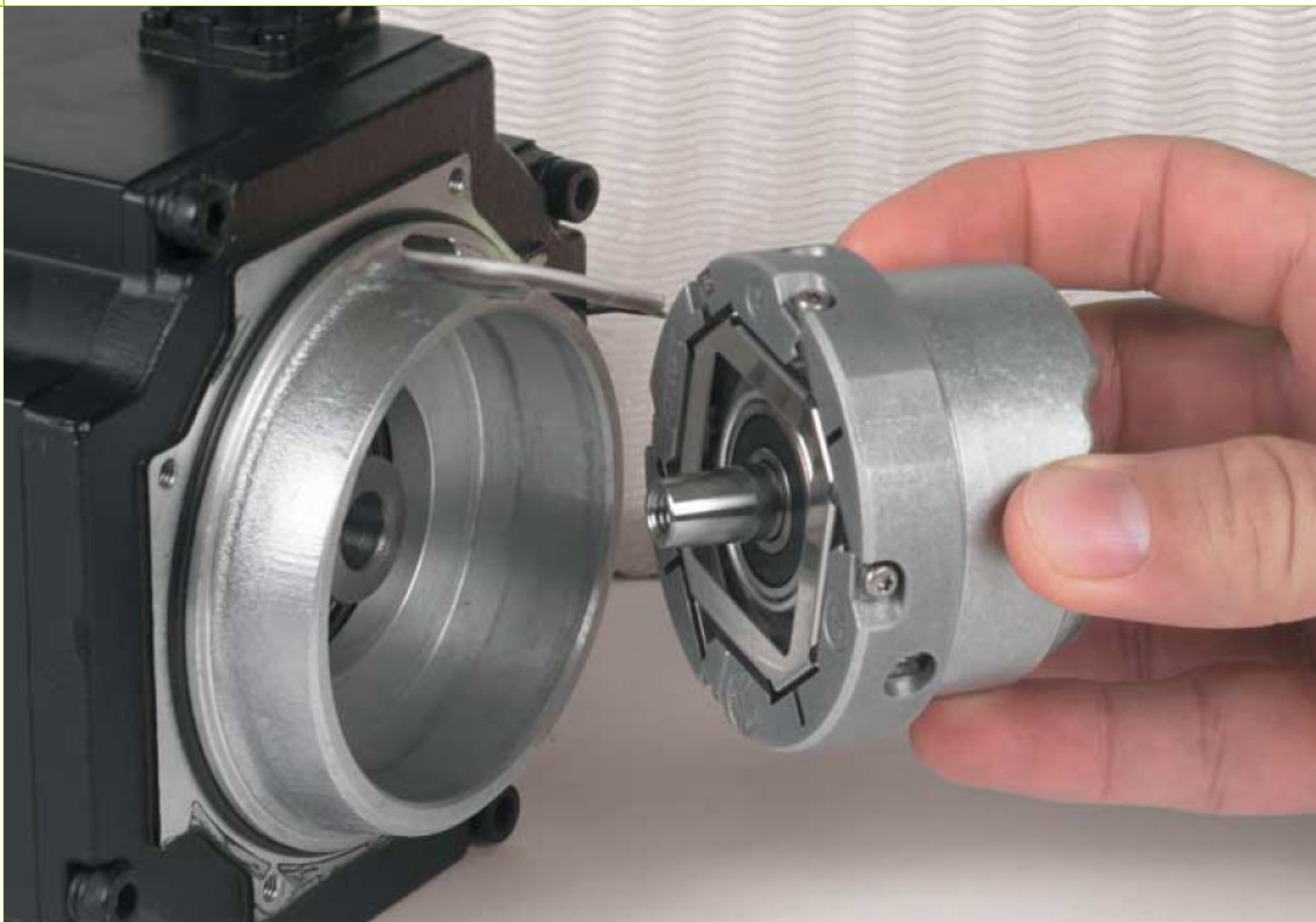
Pretnodno navedena šema kodiranja se prevodi u realni kružni oblik.

Prepoznavanje greške: Gray-ov kod poseduje jednu vrlo značajnu osobinu: paritet koda je direktno povezan sa najnižim bitom njegovog binarno kodovanog ekvivalenta – uvek kada je broj bitova u Gray-ovom kodu paran najniži bit binarno kodovanog ekvivalenta ima nultu vrednost.

Apsolutni enkodori ne zahtevaju inicijalizaciju. U svakom trenutku, kada se mehatronski sistem aktivira, očitavanjem trenutne pozicije sa kodnog diska enkodera istovremeno se očitava i stvarna pozicija mehanizma. Prethodna tvrdnja važi samo ukoliko mehanizam ima ugaoni opseg pomeranja manji od 360 stepeni. U suprotnom, ugradjuje se poseban brojački mehanizam koji još registruje i puni broj obrtaja. Nedostatak apsolutnih enkodera je povećanje broja kanala sa povećanjem rezolucije (smanjenje ugaonog kvanta). U praksi se najčešće sreću enkodori sa 8 do 12 kodnih kanala.

Savremeni trendovi u domenu gradnje apsolutnih enkodera baziraju se na direktnom upisu binarnokodirane koordinate na korespondentnu fizičku lokaciju. Ove tehnologije su zasnovane na tehnologiji zapisa velike gustine digitalnih podataka na optičkim medijumima za čuvanje podataka. Ovom tehnologijom se postižu fizičke rezolucije od 2^{25} .





Inkrementalni enkoder

Inkrementalni enkoderi rade na principu generisanja povorke impulsa čijim se brojanjem izračunava ugaoni pomeraj. Zato se inkrementalni enkoderi često nazivaju brojačkim enkoderima.

Generalno, postoje dve vrste enkodera:

1. Enkoderi sa diskretnim generatorom impulsa,
2. Enkoderi sa analognim generatorom impulsa i interpolatorom.

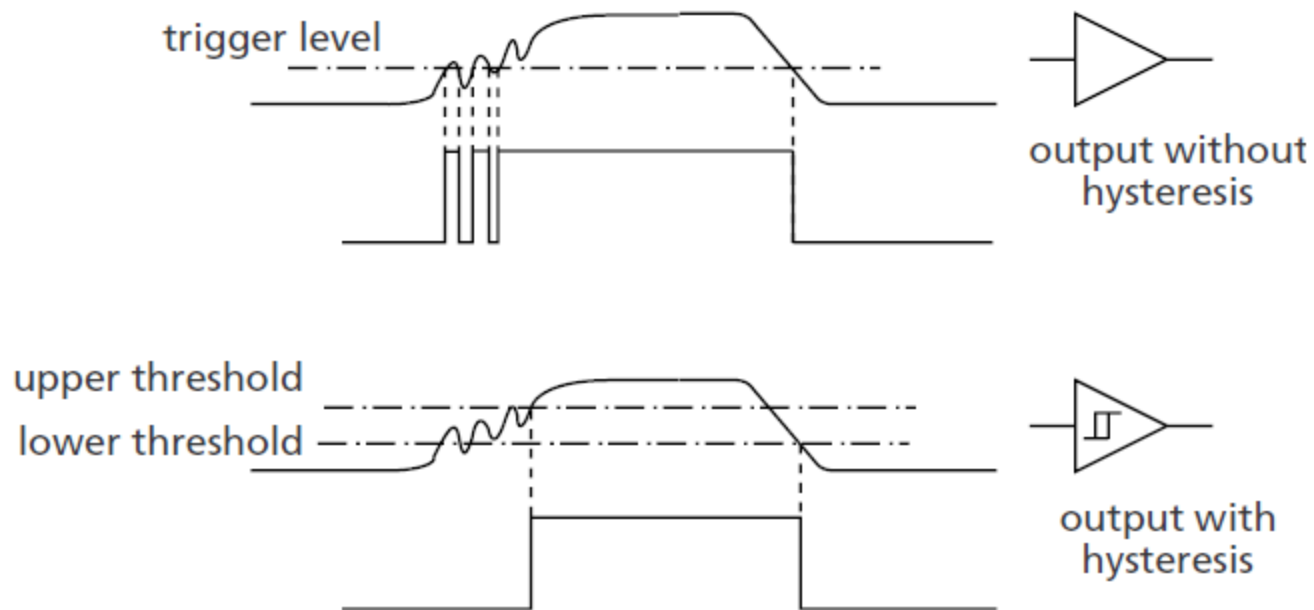
Inkrementalni enkoderi se sa podjednakom jednostavnošću izvode kao obrtni i kao linijski. Zbog brojačkog karaktera rada ove vrste enkodera, maksimalna dužina ili ugao koji se meri ograničen je samo kapacitetom brojača.

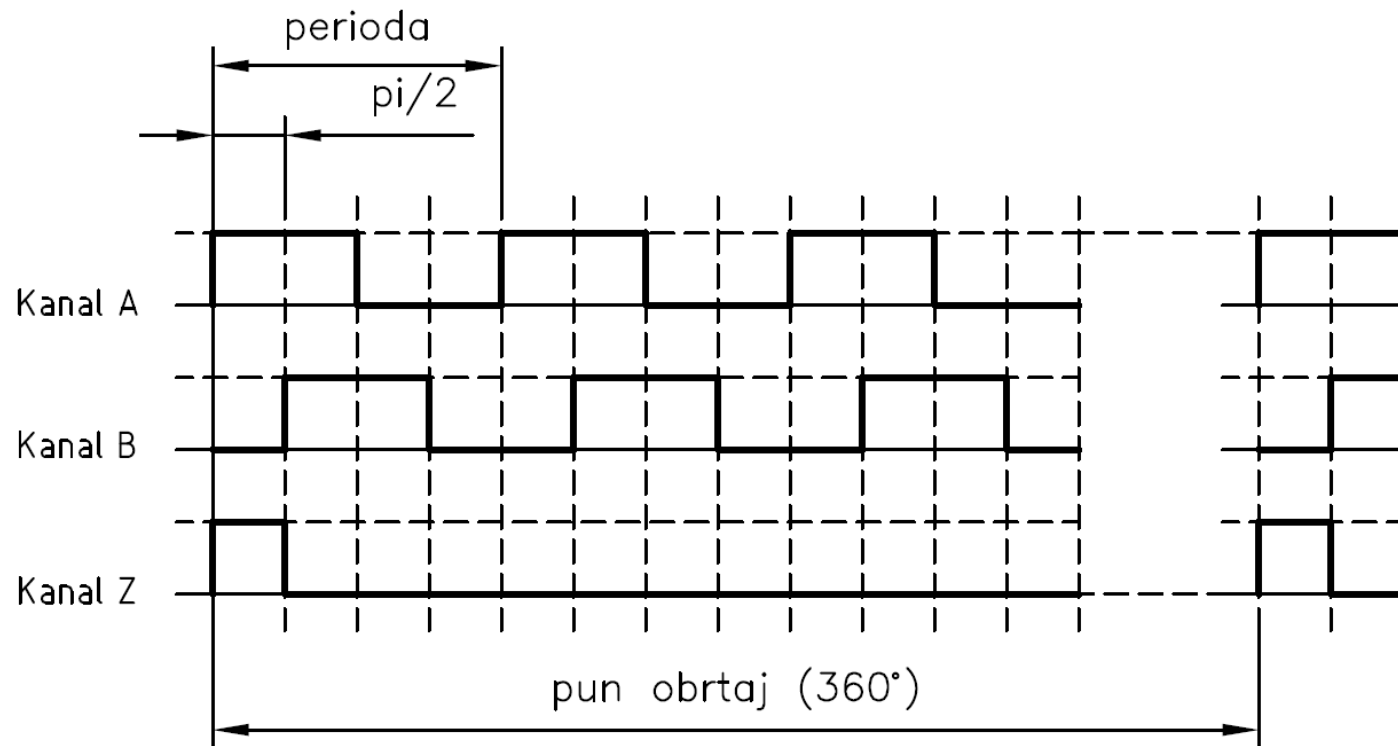
Detekcija smera: U praksi se primenjuju enkoderi koji imaju dva generatora impulsa, odnosno dva kanala koja su fazno pomerena za $\pi/2$. Prepoznavanjem koji kanal prednjači može se prepoznati i smer rotacije. Uobičajeno je da se ovi kanali označavaju velikim slovima A i B.

Referenciranje: Pored navedenih kanala koji generišu povorku impulsa, postoji i treći kanal koji sadrži samo jedna impuls po obrtaju. To je referentni kanal kojim se označava lokacija inicijalne, odnosno nulte tačke od koje se vrši brojanje. Uobičajeno je da se ovaj kanal označava slovom Z (od engleskog *zero*). U proceduri inicijalizacije mehatronskog sistema, sprovodi se i sekvenca koja omogućava da se identifikuje referentni (nulti) impuls, čime se resetuje pripadajući brojač i tako definiše koordinatni početak konkretne ose.

Enkoderi sa diskretnim generatorom impulsa

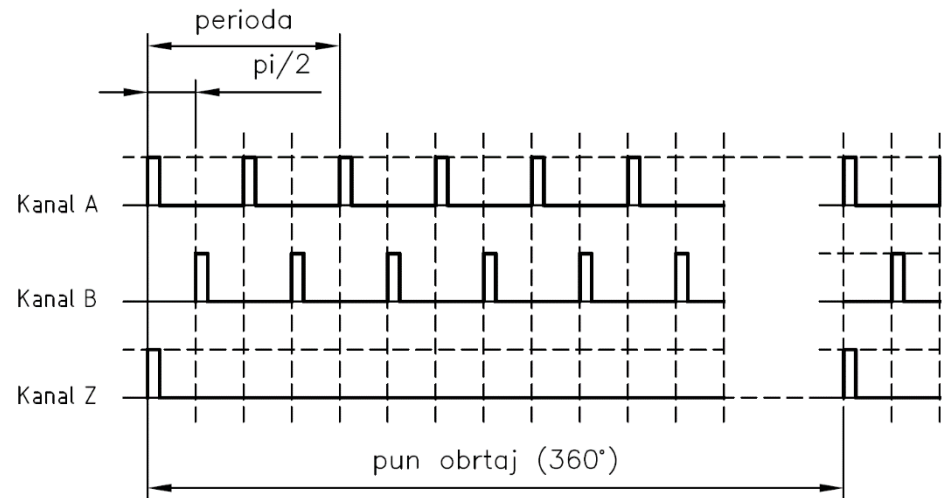
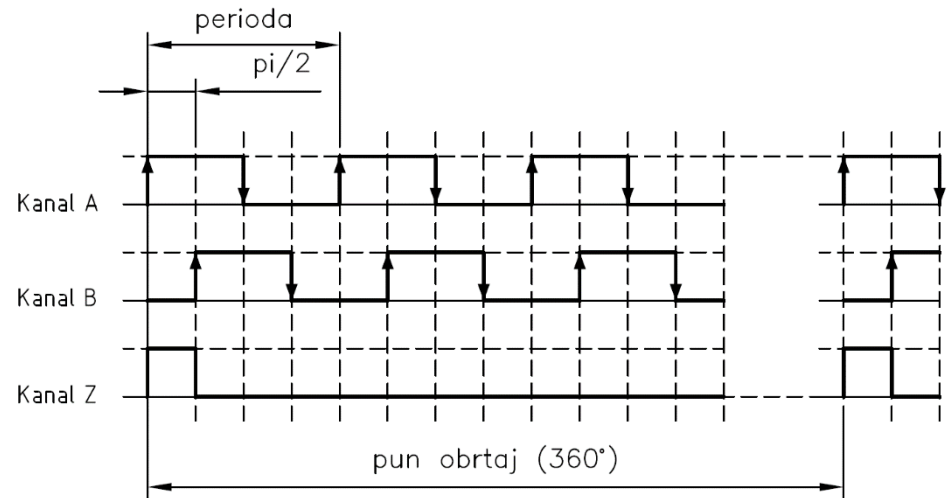
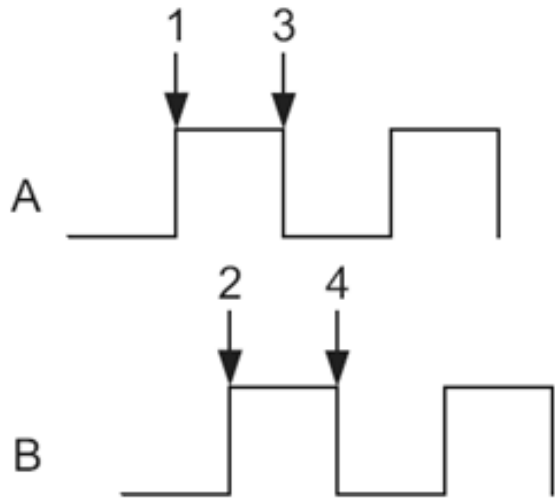
Kod ove vrste enkodera signal koji generiše fotoelektrični senzor se kolom Šmitovog okidača uobličava u pravougaonu, diskretnu formu.



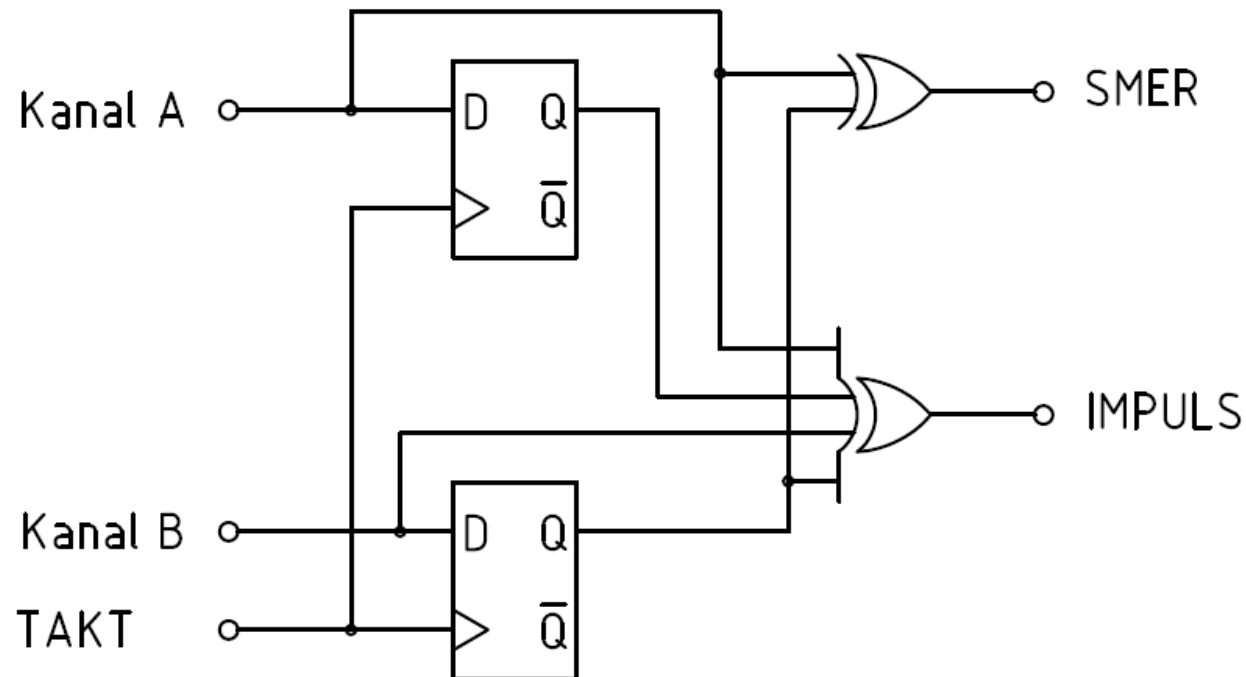


Ukoliko nije potrebno registrovanje smeru, na primer u slučajevima kada se sistem kreće isključivo u jednom, unapred poznatom smeru, onda se kanal A i kanal B superponiraju i tako udvostručuje fizička rezolucija enkodera.

Primenom logičkih kola sa ivičnim okidanjem rezolucija inkrementalnog enkodera se povećava četiri puta. Ovo je uobičajena primena inkrementalnih enkodera u servo sistemima.

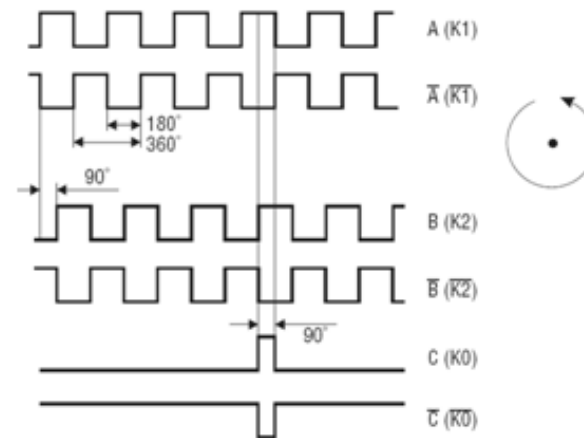
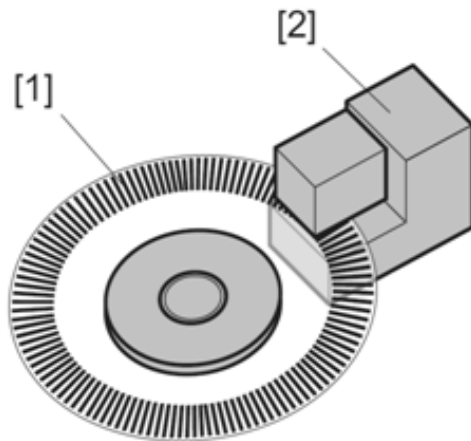
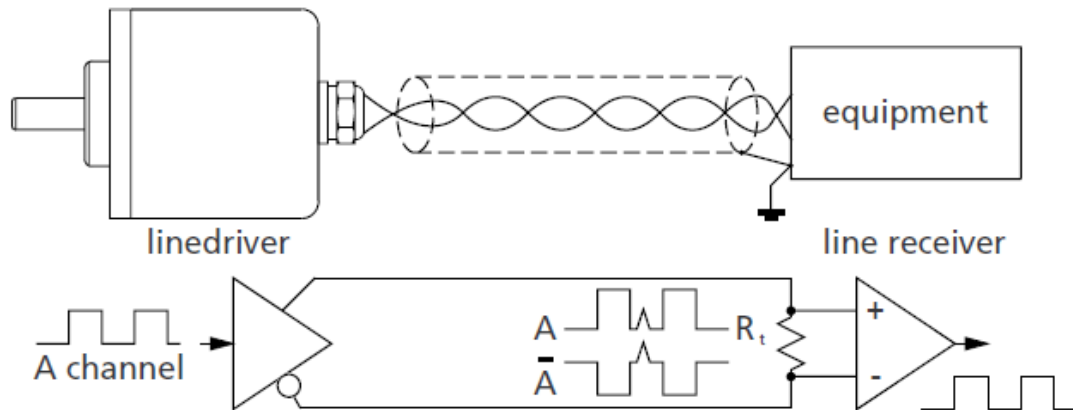


Signal koji generiše inkrementalni enkoder sa dva kanala A i B dalje se obradjuje tako da se generišu: 1)informacija o smeru i 2)niz taktnih impulsa. Ovo kolo se sastoji iz dva D filp-flopa sa ivičnim okidanjem, tako da se prepoznaje rastuća i opadajuća ivica pravougaonog impulsa koji generiše enkoder. Produkovani signal o smeru kao i niz impulsa vode se dalje u dvosmerni brzi brojač koji konačno generiše informaciju o tekućoj poziciji.



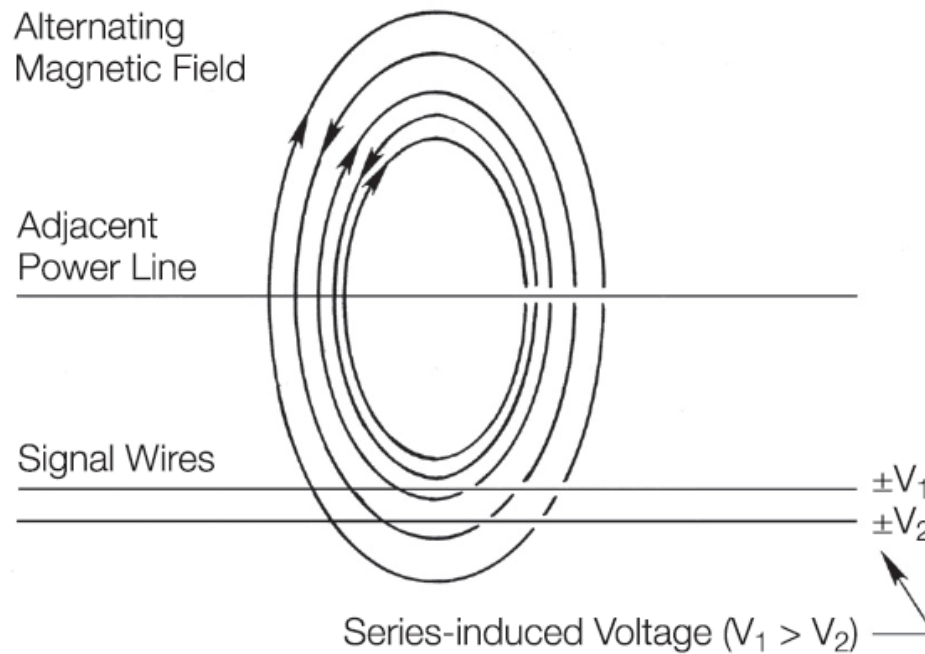
Konverzija asimetričnog u simetrični signal

Generisani signal sa kanala A, B i Z je po pravilu asimetrični signal. U cilju potiskivanja smetnji vrši se konverzija ovog signala u simetrični, kod koga se primenom principa diferencijalne superpozicije u prijemnom uređaju propušta samo korisni signal i eliminiše šum.



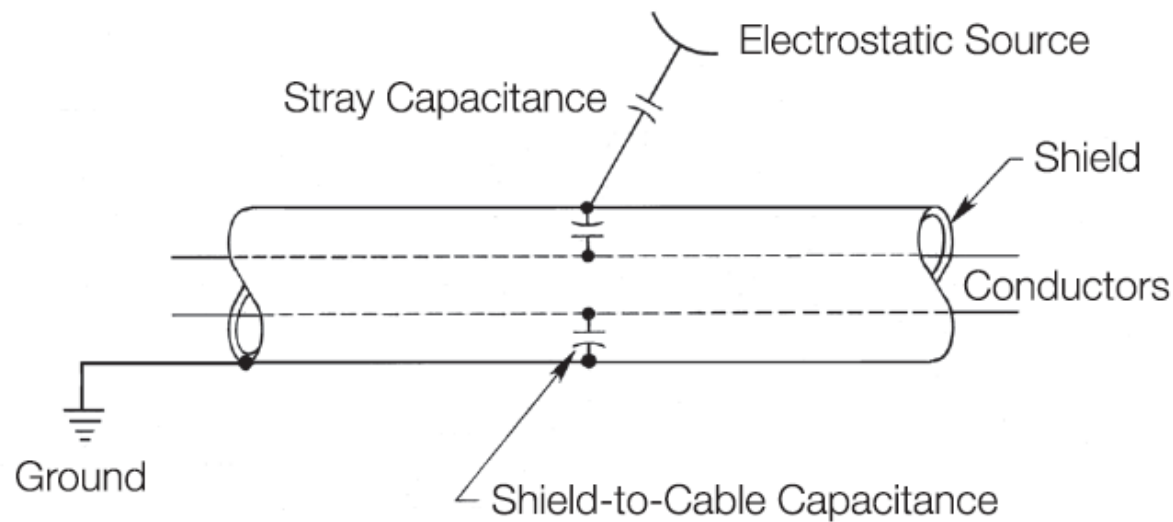
Mehanizam nastanka i potiskivanja elektromagnetnih smetnji

U industrijskoj sredini, odnosno u proizvodnim pogonima, postoje vrlo izraženi problemi smetnji u razvodu senzorskih signala izazvanih elektromagnetskim fenomenima. U svakom energetskom vodu indukuje se promenljivo magnetsko polje. To magnetsko polje indukuje električnu struju u okolnim provodnicima, uključujući i provodnike kroz koje se vode senzorski signali. Napon ovako nastale struje može da ima vrlo veliki intenzitet, često reda veličine ili veći od senzorskih signala. Očigledno je da ove komponente predstavljaju smetnju i da se moraju ukloniti.



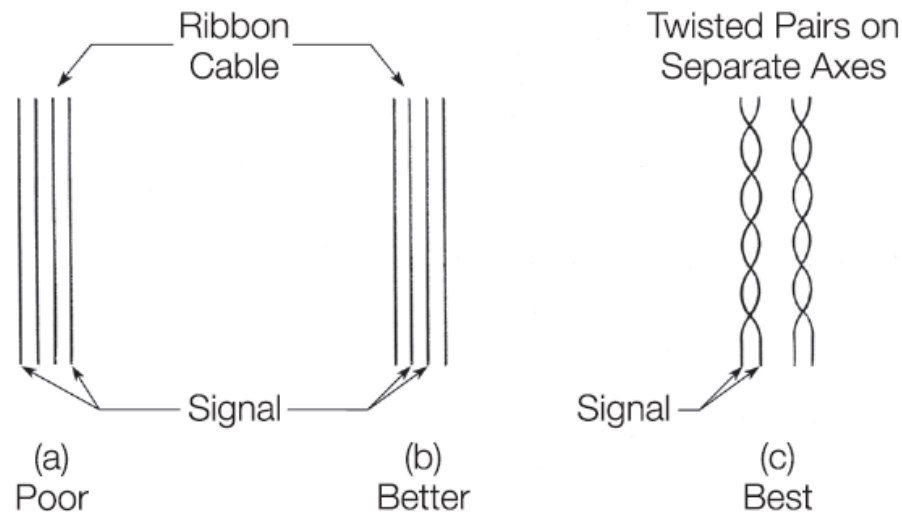
Oklapanje provodnika – Elektrostatika zaštita Faradejevim kavezom

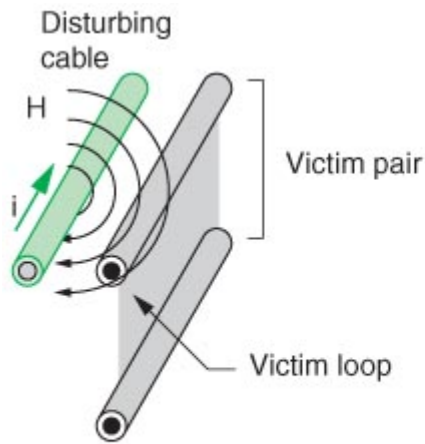
Jedna od najčešće korišćenih i po pravilu obaveznih metoda za zaštitu senzorskih vodova od elektromagnetskih smetnji jeste oklapanje vodova mrežom međusobno prepletenih provodnika koji u potpunosti obuhvataju senzorske vodove. Ova mreža formira elektromagnetski kavez koji onemogućava proboj spoljašnjeg magnetskog polja u unutrašnji prostor u kome se nalaze senzorski vodovi. Indukovana struja indukovana u oklopu se odvodi tako što se jedan od krajeva oklopa povezuje sa nulnim naponskim potencijalom, najčešće na uzemljenje, ili kućište senzora ili prijemnog uređaja.



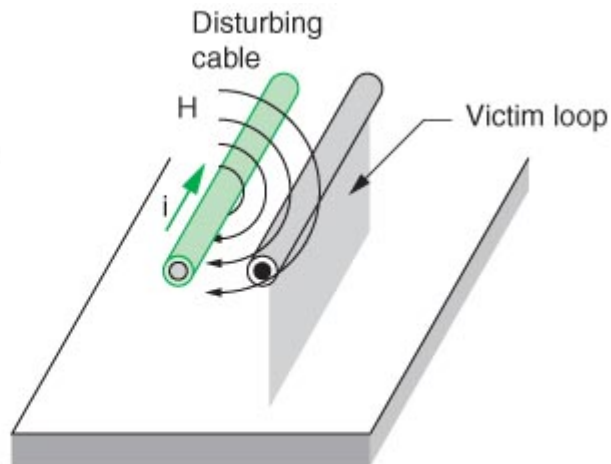
Raspored (vodjenje) provodnika kod polaganja razvodnih instalacija

Pored smetnji koje nastaju indukovanjem struje od okolnih energetskih vodova, moguća je pojava indukcije smetnji od susednih senzorskih vodova, posebno ukoliko se provodnici polažu paralelno, jedan uz drugi i ukoliko su ti vodovi dugi. Tada se informacioni sadržaj jednog voda utiskuje u senzorski sadržaj drugog voda. Ovaj fenomen se naziva induktivno sprezanje ili preslušavanje i predstavlja smetnju koja se mora ukloniti. Najbolji način je da se izbegne paralelno polaganje senzorskih vodova u neposrednoj blizini. To najčešće nije moguće iz praktičnih razloga, zato se primenjuju odgovarajuće mere kojima se smetanja ove vrste potiskuje. Najčešći način je upredanje parova vodova jednog senzorskog izvora. Kablovske veze ove vrste nazivaju se upredene parice i vrlo često se primenjuju u praksi.

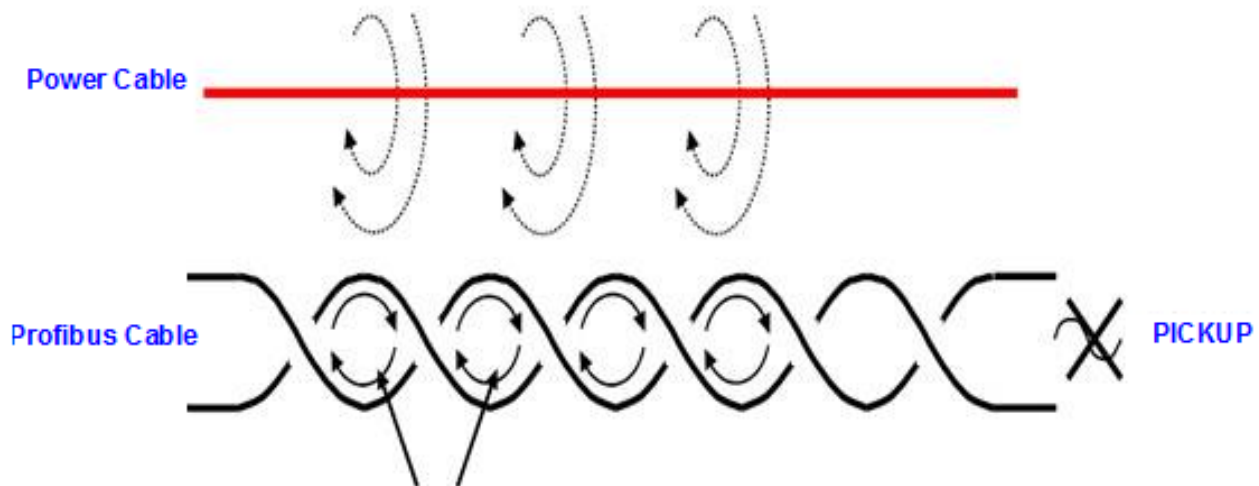




Differential mode



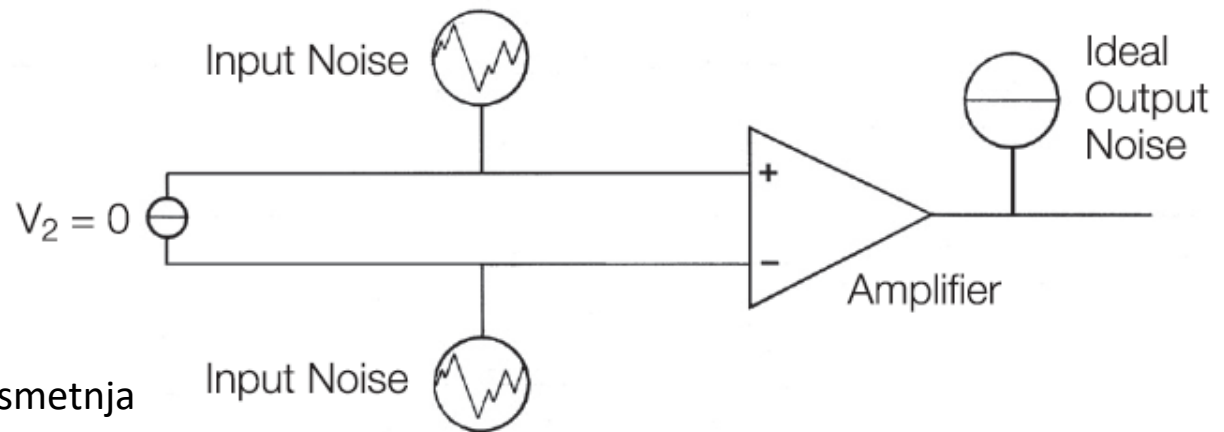
Common mode



With twisted cable, the induced currents tend to be cancelled on the adjacent loops

Simetrični izlazi

Prethodno navedene metode zaštite od elektromagnetskih smetnji se mogu nazvati pasivnim, jer one sprečavaju indukovanje smetnje u senzorskom vodu. Pored toga, potiskivanje smetnji se može ostvariti primenom aktivnih metoda. Najčešće primenjivana je metoda koja je bazirana na simetričnom ili diferencijalnom razvodjenju senzorskih signala. Posebnim invertorskim kolom senzorski signal se pretvara u njegov komplement i zatim se zajedno sa njegovim komplementom vodi kroz dva provodnika do prijemnog uređaja. Na ulazu prijemnog uređaja se nalazi kolo koje oduzima ova dva signala – diferencijalni pojačivač. Diferenciranjem ulaza potiskuju se simetrični sadržaji a udvostručuju svi asimetrični.



U idealnom slučaju važi:

$$S1 = S + \text{smetnja}$$

$$S2 = \text{inv}(S) + \text{smetnja} = -S + \text{smetnja}$$

$$\text{Izlaz} = S1 - S2 =$$

$$= [S + \text{smetnja}] - [-S + \text{smetnja}] = 2S$$

Figure 4. Noise cancellation by amplifier common-mode rejection.

Model/Output Circuits	Output mode	Connection												
E6B2-CWZ6C 	E6B2-CWZ6C NPN Open-collector Output Model E6B2-CWZ5B PNP Open-collector Output Model Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft) Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft) 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Terminal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>Power supply (+Vcc)</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table>	Color	Terminal	Brown	Power supply (+Vcc)	Black	Output phase A	White	Output phase B	Orange	Output phase Z	Blue	0 V (common)
Color	Terminal													
Brown	Power supply (+Vcc)													
Black	Output phase A													
White	Output phase B													
Orange	Output phase Z													
Blue	0 V (common)													
E6B2-CWZ5B 	Note: Phase A is 1/4 T ± 1/8 T faster than phase B. Note: Phase A is 1/4 T ± 1/8 T slower than phase B. (The ONs in the above timing chart mean that the output transistor is ON and the OFFs mean that the output transistor is OFF.)													
E6B2-CWZ3E 	E6B2-CWZ3E Voltage Output Model Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft) Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft) 	<p>Quadrature outputs can come in one of the following formats:</p> <p>LINE DRIVER (5VDC)</p> <p>A Line Driver is a sourcing output. When in the ON state, a line driver will supply Vcc (Supply Voltage). In the OFF state, a line driver will float. Because of this, a sinking input is required for proper operation.</p> <p>OPEN COLLECTOR</p> <p>An Open Collector is a sinking output. In the OFF state, an open collector will supply a path to ground. When in the ON state, an open collector will float. For proper operation, a Sourcing input is required.</p>												
E6B2-CWZ1X 	E6B2-CWZ1X Line Driver Output Model Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft) Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft) 													

Ovde treba navesti standardne izlaze za enkoder:

1. open collector (otvoreni kolektor) NPN/PNP koji je tipican za rad sa PLC uređajima jer se ponasa kao prekidač napajan od strane potrosaca!!! On daje samo informaciju, nista vise
2. LINE DRIVER je naponski generator i potrosacu salje naponski signal (ne cista informacija) koji u potrosacu okid LED diodu, odnosno optokaplenski sklop i tako prenosi informaciju
3. Push Pull je kombinacija otvorenog kolektora i Line driver

<https://www.posital.com/en/products/communication-interface/incremental/incremental-encoders.php>
<https://www.guidavices.com/blog/comparison-of-common>

akt def ner om ičiv

VDC) (5VDC)

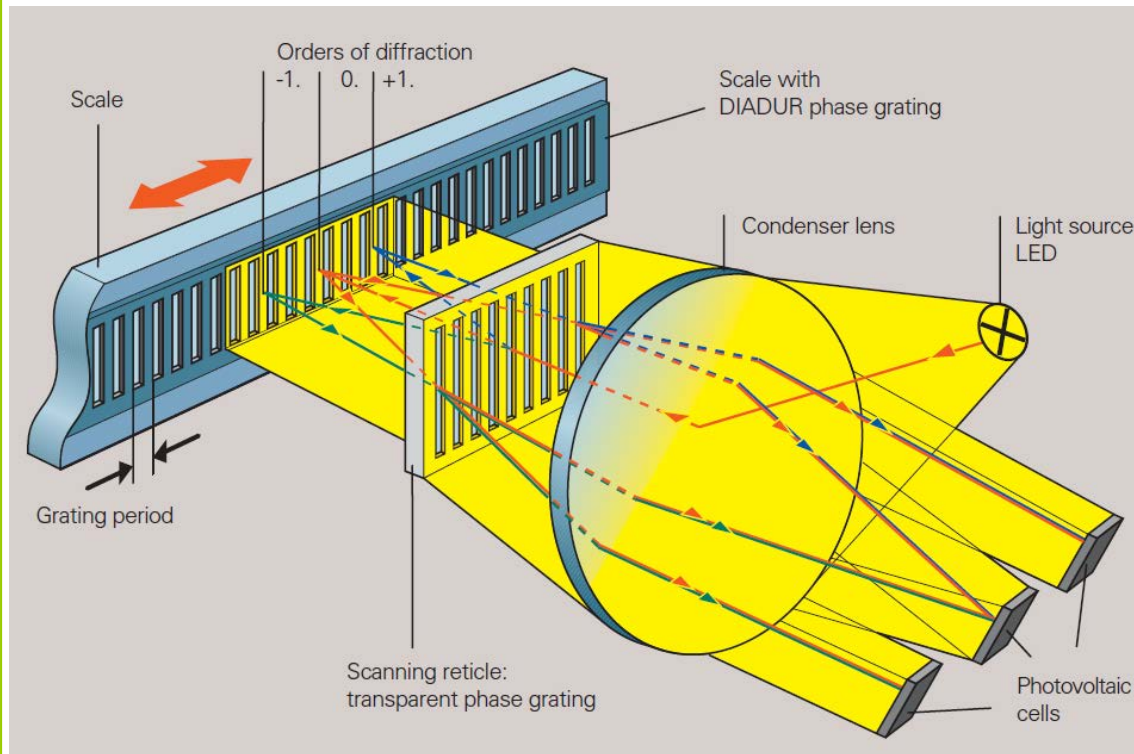
e driver and an open collector. In the ON state it will supply Vcc

c High (>=2.5Vdc) and Logic Lo 22 Line Driver at 5Vdc.

Note: Receiver: AM26LS32 equivalent

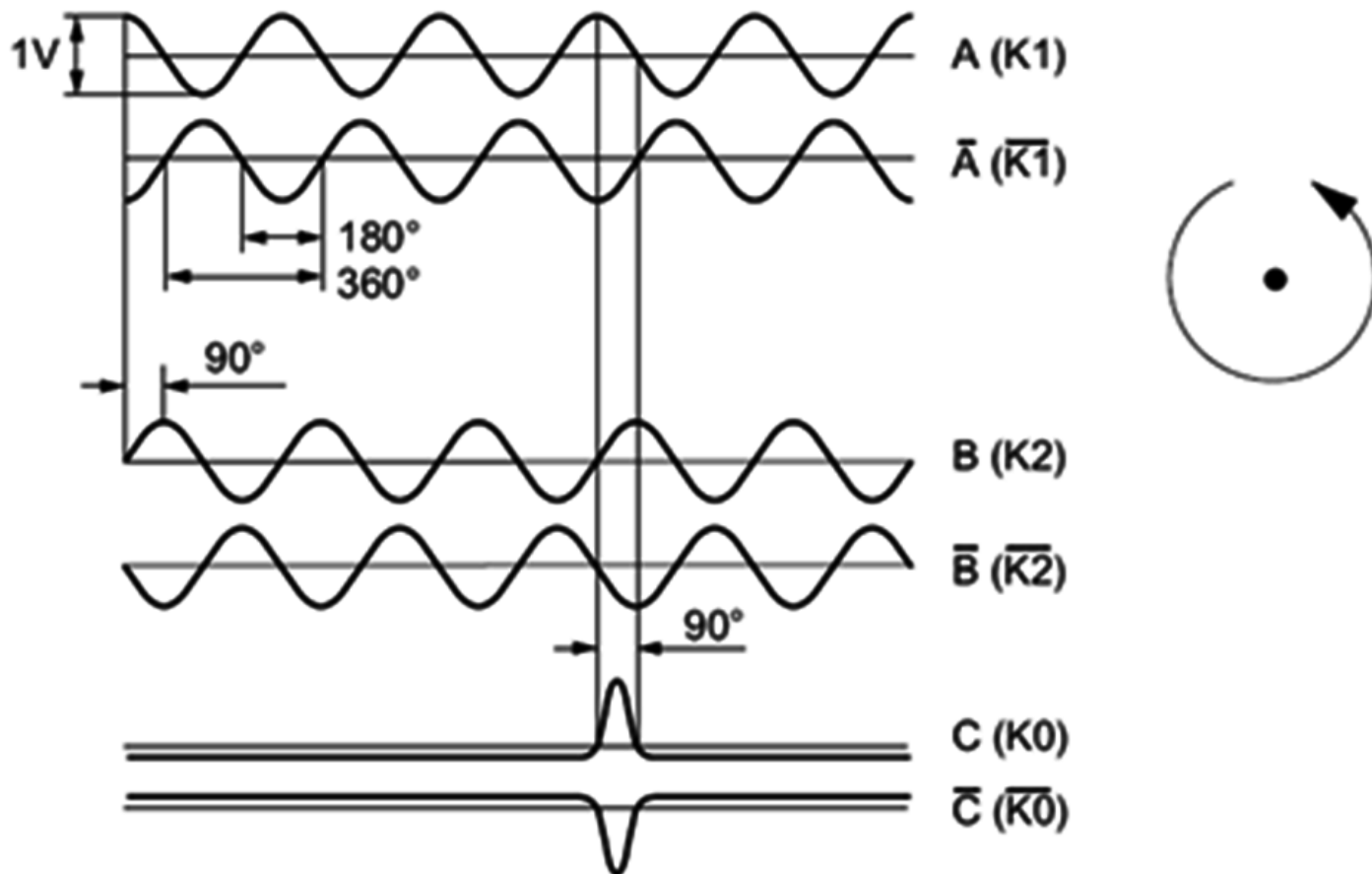
Enkoderi sa analognim generatorom impulsa

Maska i kompletan optoelektrični pretvarač kod ove vrste enkodera je tako izveden da oni generišu dva prostoperiodična harmonijska signala savršenog oblika (sa minimumom izobličenja i prisustva šuma). Kao i u prethodnom slučaju, kanal B je pomeren za $\pi/2$ u odnosu na kanal A tako da se na izlazu praktično pojavljuju dva signala idealnog sinusnog i kosinusnog oblika konstantne prostorne frekvencije.

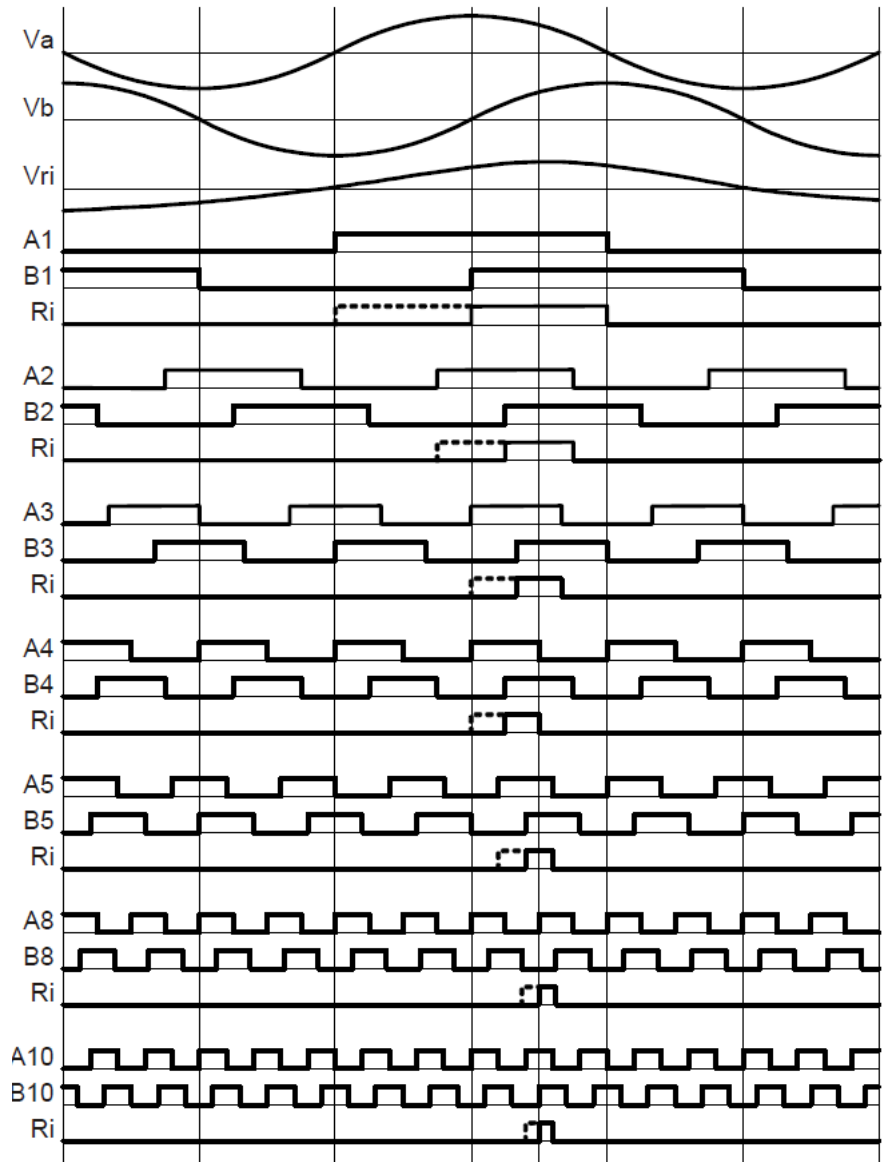
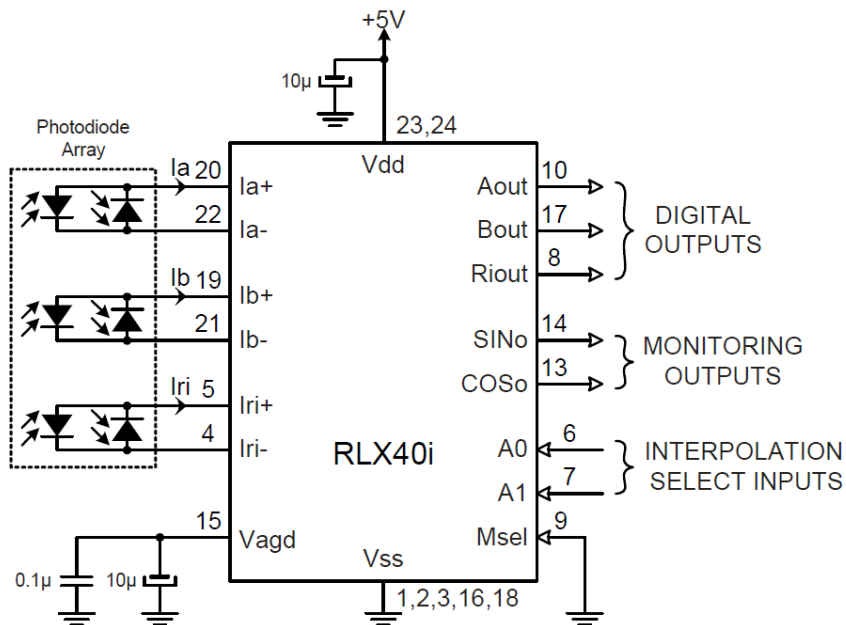


Kod ove vrste enkodera moguće je ostvariti ekstremno veliku rezoluciju, praktično kontinualno merenje pozicije, a osnovno ograničenje je nivo prisutnog šuma. Komercijalno su raspoloživi enkoderi ove vrste sa brojem inkremenata po obrtaju koji prelazi vrednost 10^6 i fizički odgovara ugaonoj sekundi ili njenim delovima. Takodje, kod ove vrste enkodera diferenciranjem signala izvodi se praktično kontinualna informacija o brzini.

Izgled generisanih signala prikazan je na slici ispod. Da bi se potisnuo šum, optoelektronički sklop generiše simetrični izlaz (analogni komplement).

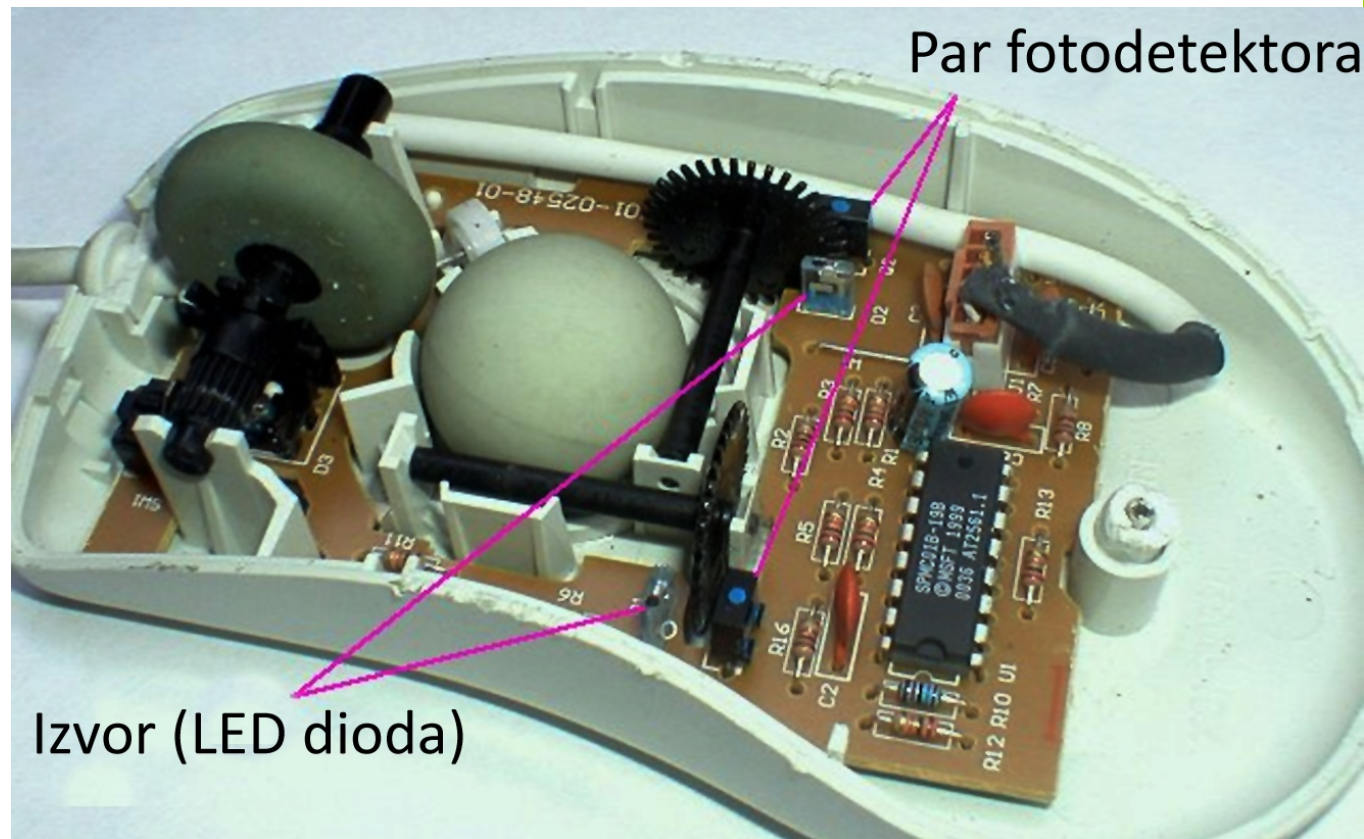


Posebim kolom vrši se diskretizacija generisanog analognog signala i njegovo pretvaranje u digitalni oblik. Proces digitalizacije ove vrše naziva se interpolacijom. Postoje specijalna kola za interpolaciju sa mogućnošću izbora faktora interpolacije. Savremeni interpolatori dostižu faktor interpolacije 2^{14} .



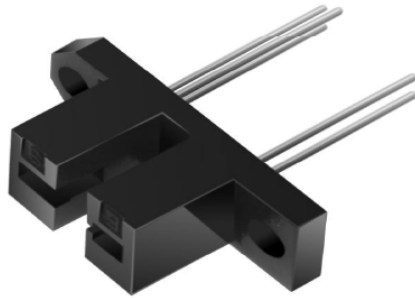
PRIMERI:

Mehanički miš registruje pomeraj kuglice pomoću dva ortogonalna enkoderska sklopa.

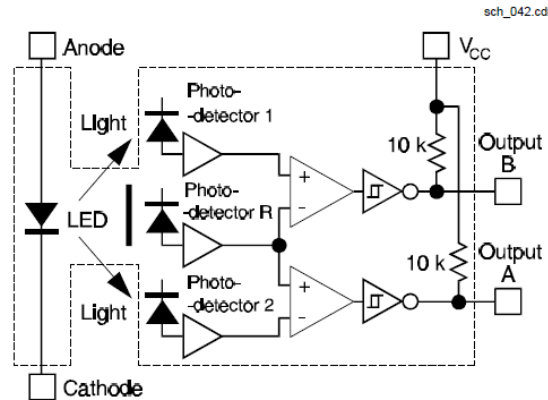


HOA0901

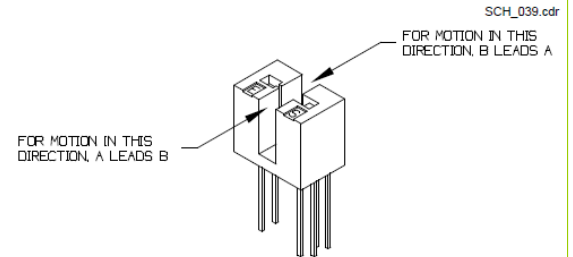
Transmissive Encoder Sensor



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



OUTPUT CONFIGURATION WITH MOTION



OUTPUT TIMING DIAGRAM

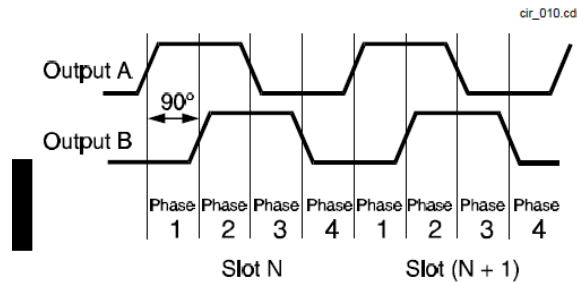


Fig. 1 IRED Forward Bias Characteristics

SWITCHING WAVEFORM

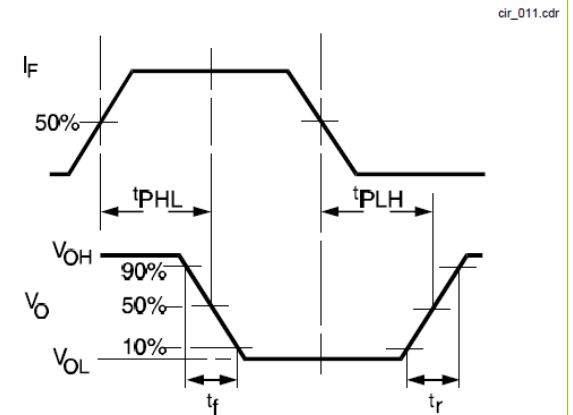
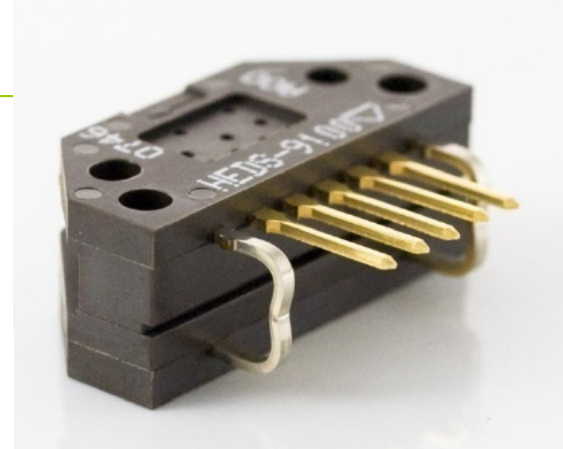
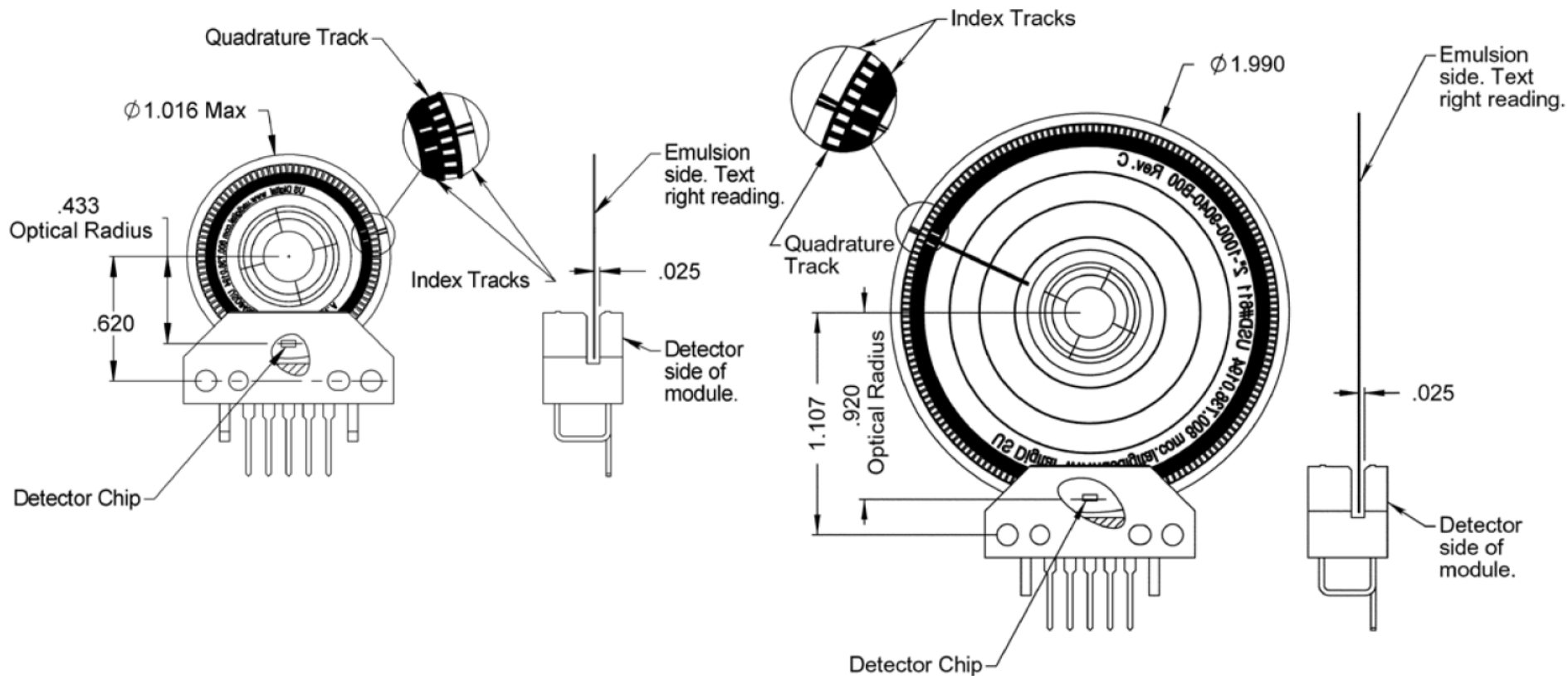


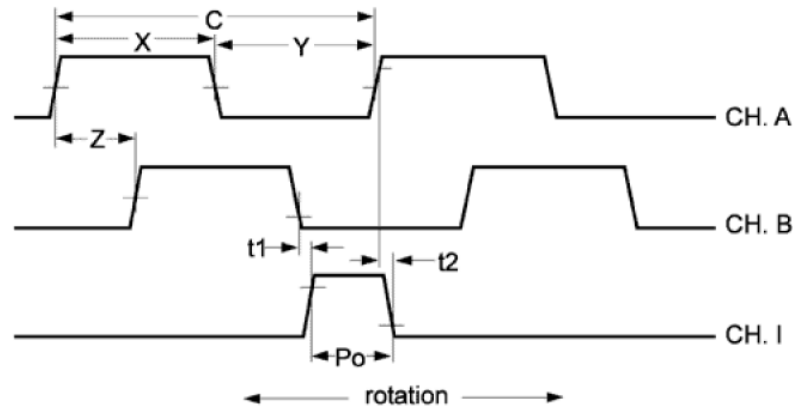
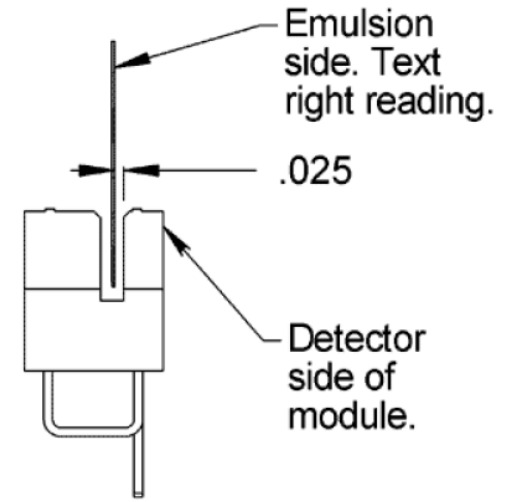
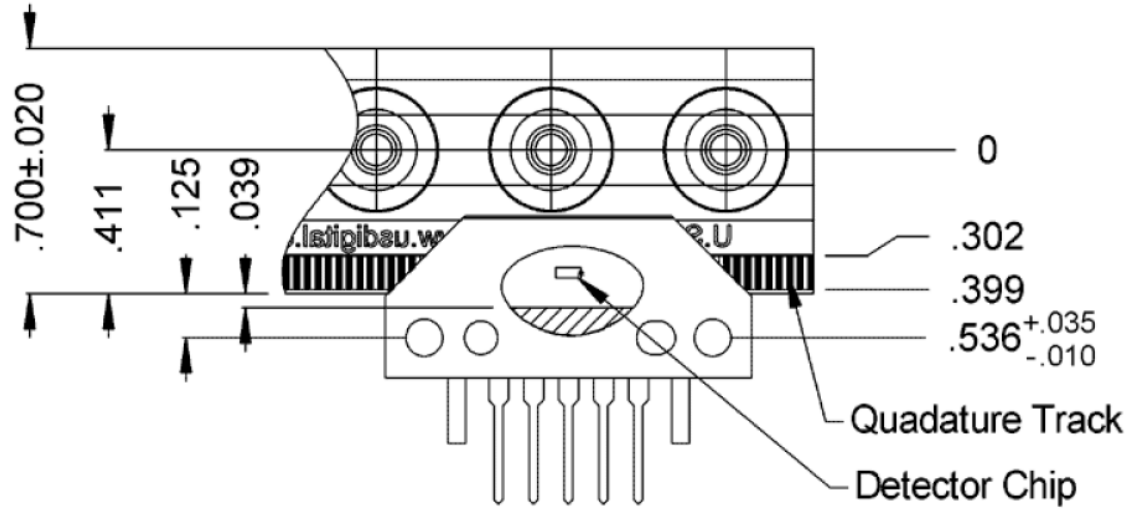
Fig. 2 IRED Trigger Current vs Temperature

Transmissive Optical Encoder Module



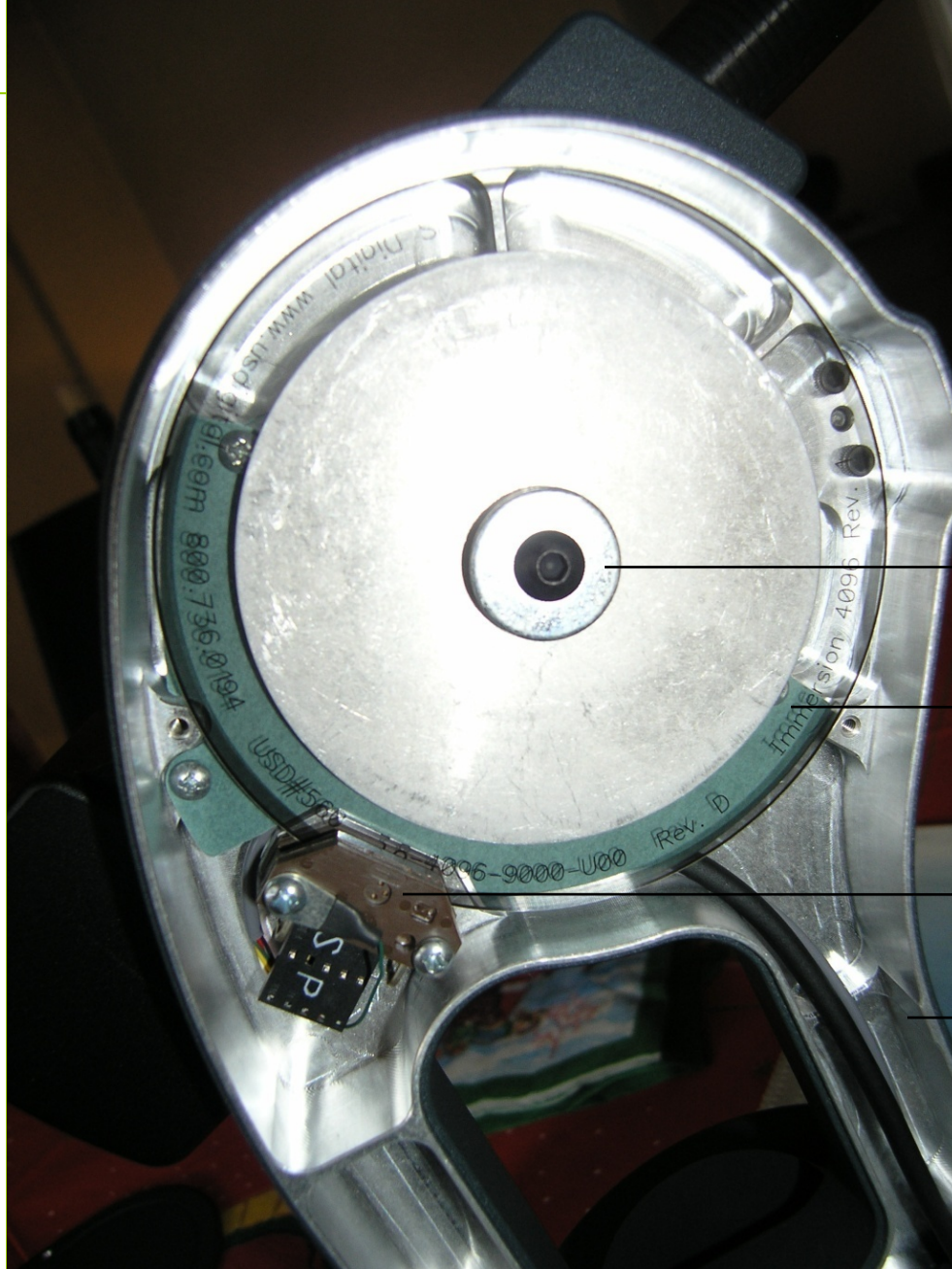
Maksimalno 2048 fizičkih impulsa, napajanje 5 VDC, max 100kHz radna frekvencija.







Slučaj kada je enkoder ugradjen u mehaničku strukturu obrtnog zgloba. Ovde se pod pojmom 'ugradjen' podrazumeva da je enkoder integrisan u sklop zgloba na isti način na koji se integriše ležaj, zaptivka, ili neka druga komponenta.



Osovina

Kodni disk

Optoelektrični pretvarač

Kućište zgloba





Taktilne merne sonde sa ugradjenim linijskim enkoderom za primenu u automatskim mernim stanicama za brzu kontrolu geometrije proizvedenog dela.

b3: analogni senzori

b3.1 Merenje sile

Merenje sile, kao i sa tim povezanog naponskog stanja neke konstrukcije je jedan od zadataka koji se najčešće sreću u proizvodnim tehnologijama.

Merenje sile se može izvesti na više načina, ali uvek indirektno – mi ne možemo da merimo silu na direktan način, uvek merimo odziv neke elastične konstrukcije na njeno dejstvo.

Silu možemo da merimo primenom mernih traka, primenom piezorezistivnih pretvarača i jedne široke klase senzora koji su u osnovi projektovani za merenje malih pomeraja (induktivni senzori, optički senzori, itd.)

Inercijalne sile možemo da merimo posebnim sensorima koji su namenjeni za merenje ubrzanja vibracija – akcelerometri.

U okviru ovog kursa detaljno se razmatraju senzori sile bazirani na mernim trakama. Merne trake su pogodne za merenje statičkih i dinamičkih opterećenja. Merne trake su posebno pogodne za merenje niskofrekventnih dinamičkih opterećenja.

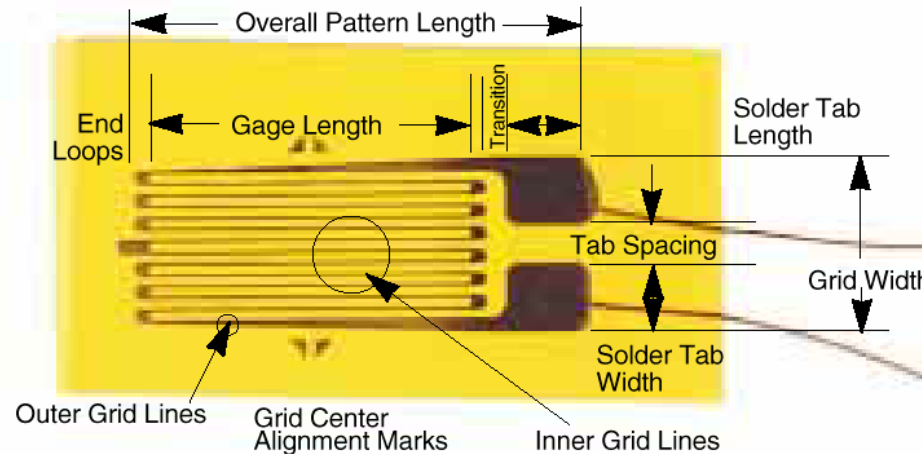
Merne trake su temperaturno osetljive iz zahtevaju kompenzaciju, posebno za slučaj dugotrajnih merenja.

Konstrukcija senzora, električnog i mehaničkog dela sklopa, zavisi od vrste opterećenja koje se meri i broja komponenti (višekomponentni senzori sile).

Merna traka

Koncept merne trake baziran je na fizičkom fenomenu promene otpora nekog provodnika sa promenom njegovih dimenzija. Povećanje ili smanjenje dužine nekog električnog provodnika pod dejstvom sile koja deluje na njegovim krajevima dovodi do proporcionalne promene njegovog otpora. Merenjem promene otpora istovremeno se meri i intenzitet sile koja je izazvala tu promenu otpora.

Merne trake se proizvode tehnikom štampe provodnog sloja na neku izolacionu podlogu, koja treba da obezbedi mehaničku stabilnost i električnu izolaciju senzorskog sistema od objekta na koji se merna traka fiksira.



Sa aspekta praktične primene, bitan je faktor osetljivosti merne trake, koji predstavlja meru proporcionalnosti izmedju relativnih deformacija i relativne promene otpora izazvanog tim deformacijama. Faktor osetljivosti merne trake G_f definisan je sledećom relacijom:

$$G_f = (\Delta R / R_0) / (\Delta L / L_0) = \Delta R / R_0 / \varepsilon$$

pri čemu je L_0 označena neopterećena dužina merne trake u pravcu njene glavne ose simetrije, ΔL je apsolutno izduženje merne trake pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja, R_0 je otpor neopterećene merne trake a ΔR je relativna promena otpora izazvano njenom promenom dužine. Sa ε je označena relativna deformacija merne trake, za koju prema Hukovom zakonu važi:

$$\sigma = E * (\Delta L / L_0) = E\varepsilon$$

pri čemu takodje važi:

$$\sigma = F / A$$

a odatle:

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & & \downarrow \\ F = [(E * A) / (G_f * R_0)] * \Delta R \end{array}$$

Ova relacija je vrlo značajna, jer ona povezuje promenu vrednosti otpora merne trake i sile koja je tu promenu izazvala. Faktor osetljivosti metalne merne trake najčešće ima vrednost 2. Faktor osetljivosti merne trake izradjene od poluprovodničkog materijala ima značajno veću vrednost (50 do 100).

Oblik merne trake

Oblik merne trake je prilagodjen specifičnim uslovima primene i zadacima koji se postavljaju u konkretnom slučaju merenja. Dalje se navode primeri standardnih oblika koji se najčešće koriste u praksi.

Jednokomponentne merne trake

Faktor osetljivosti: 2

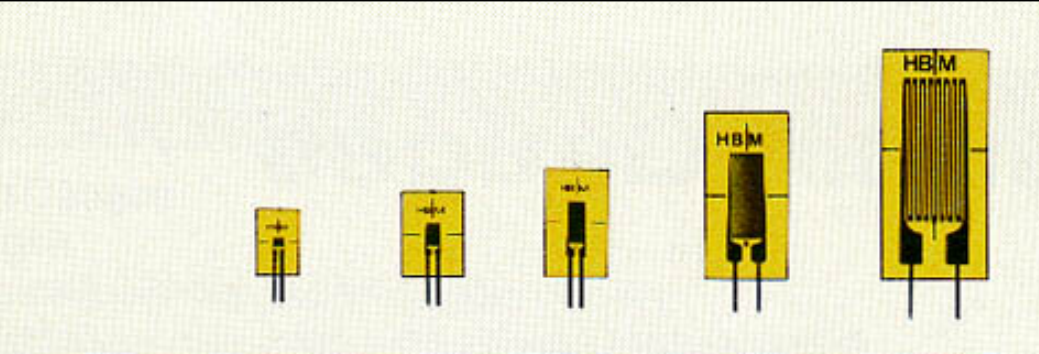
Nominalna otpornost: 120, 350, 600 i 1000 Ohm






Linearnost: 0.1% do 4000 $\mu\epsilon$ i u okviru 1% do 10000 $\mu\epsilon$

Prekidna dilatacija: 20000 do 25000 $\mu\epsilon$

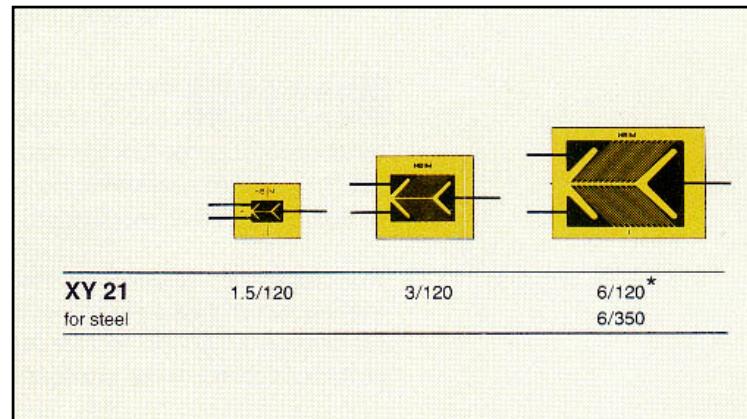
Broj radnih ciklusa: do $1e7$

Faktor termičke dilatacije prilagodjen čeliku, nerdjajućem čeliku, aluminijumu, titanijumu, magnezijumu, plastičnim materijalima (polimeri)

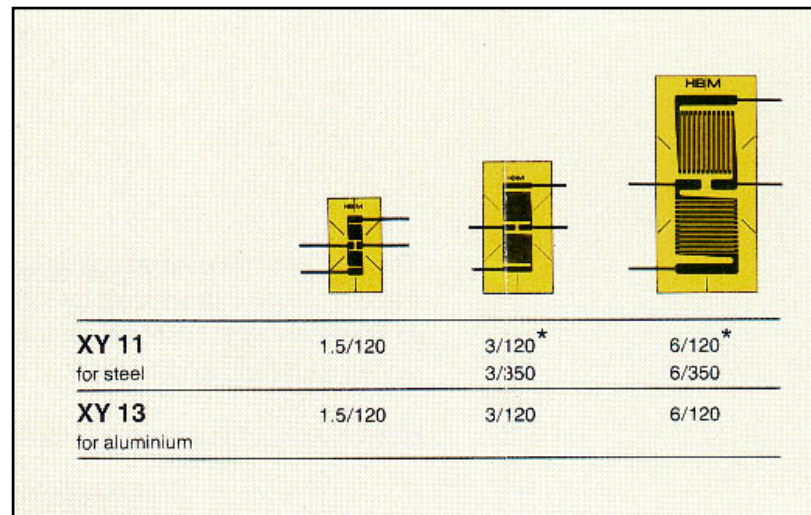


					
LY 11	0.6/120	1.5/120	3/120*	6/120*	10/120
for steel			3/350	6/350	10/350
LY 13	0.6/120	1.5/120	3/120	6/120	10/120
for aluminium			3/350	6/350	10/350

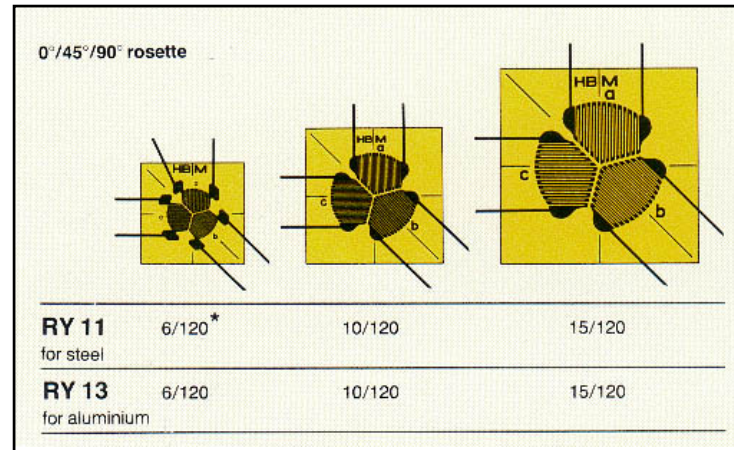
Dvokomponentne merne trake, 45 deg osa, za merenje smicajnih napona



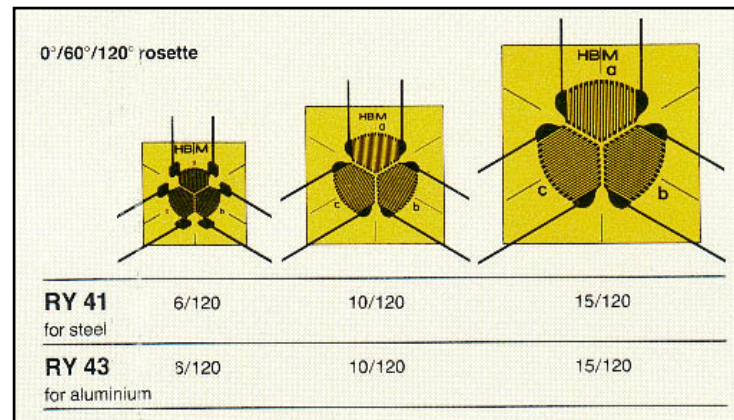
Dvokomponentne merne trake, 90 deg osa



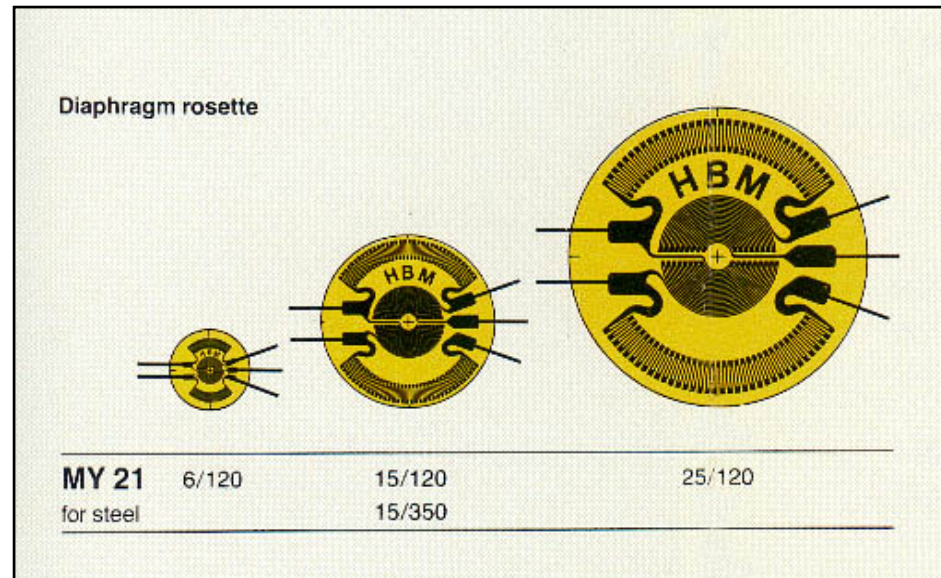
Trokomponentne merne trake, 0 / 45 / 90 deg ose, za merenje napona



Trokomponentne merne trake, 0 / 60 / 120 deg ose, za merenje napona



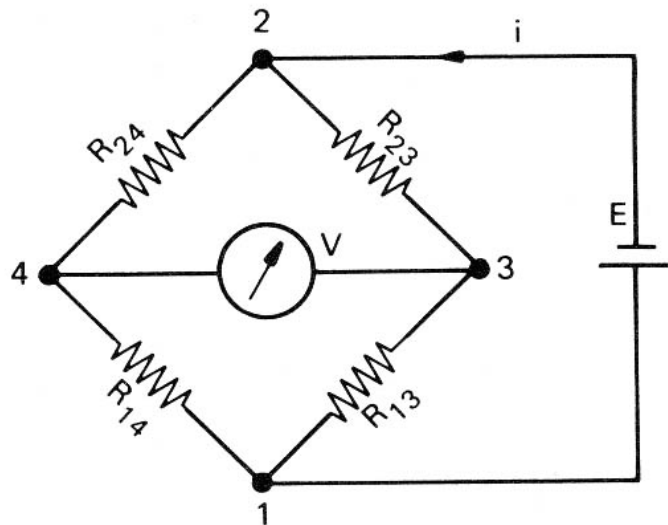
Višekomponentne merne trake specijalne namene



Membranske merne trake za ugradnju u senzore pritiska.

Praktična primena u gradnji senzora – WITSTON-ov MOST

Ukoliko, na primer, sila koja deluje na neku elastičnu strukturu izazove deformaciju od $1 \mu\epsilon$ i ako se primeni merna traka od 120Ω sa faktorom osetljivosti 2, sledi da će promena otpornosti merne trake biti samo $120 \mu\Omega$. Da bi smo merili ovako malu promenu otpora moramo da raspolažemo ekstremno osetljivim instrumentom. Merenje ovako male promene otpornosti je moguće primenom jednog posebnog električnog kola koje se naziva Vitstonov (Wheatstone) most.



Vitstonov most se sastoji iz četiri grane na kojima se nalaze četiri otpornika.

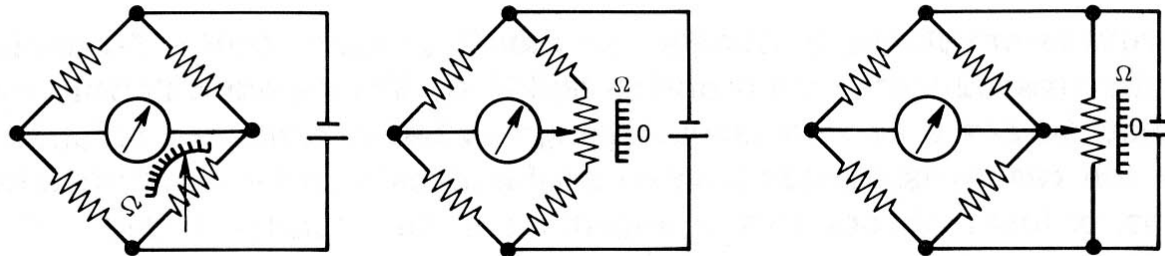
Most se napaja stabilisanim izvorom napajanja u čvoru 1 i čvoru 2. Merni instrument, u ovom slučaju voltmetar, priključuje se na dijagonali 3-4.

Ukoliko je most u ravnoteži, tada je zadovoljena sledeća relacija:

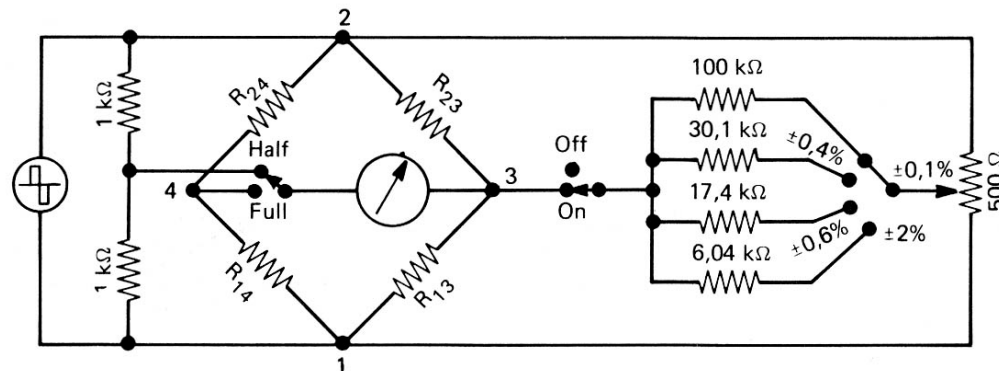
$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

tada je razlika potencijala između tačaka 3 i 4 jednaka nuli. Ukoliko most nije u ravnoteži, onda će voltmetar registrovati promenu potencijala. Na ovaj način se promena otpornosti nekog otpornika prevodi u naponsku informaciju.

Pre početka merenja, neophodno je dovesti most u ravnotežu. Precizno balansiranje se može ostvariti na jedan od tri načina:



Kod savremenih instrumenata sistem za balansiranje mosta izvodi se na sledeći način:



Balansiranje mosta, odnosno otklanjanje inicijalnog debalansa je prilično delikatan zadatak i obavezno se mora sprovesti. Inicijalni debalans je često za više redova veličina veći od promene otpora koje izaziva radno opterećenje i zato je softverski debalans nemoguće sprovesti – most se nalazi u zasićenju na nivou osetljivosti bitnim za rad sistema. Balansiranjem se most dovodi neku vrstu radne tačke.

Četvrtinski merni most

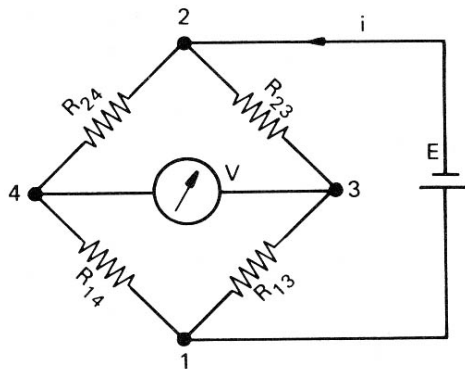
Witstonov merni most može da se tako konfigurira da tri otpornika u proizvoljno izabranim granama budu izvedeni kao pasivni otpornici. Četvrti otpornik je merna traka. Otpornost pasivnih otpornika se bira tako da se zadovolji uslov ravnoteže mosta u neopterećenom stanju merne trake.

Napon V koji se meri voltmetrom u mernoj dijagonali definisan je relacijom:

$$V = E \Delta R / 4R$$

odakle sledi relacija za izračunavanje relativne deformacije tela senzora, iz koje se dalje može izračunati napon na mestu merne trake i sila kojom je senzor pobudjen:

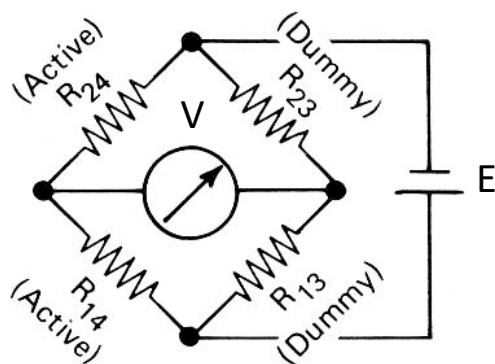
$$\varepsilon = 4V / E G_f$$



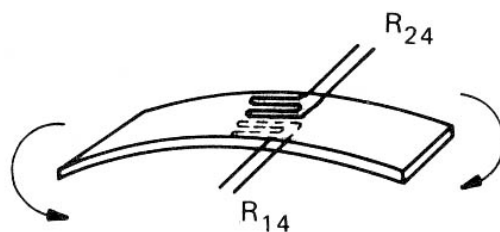
$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

Polumost

Četvrtinski Witstonov merni most ima dva ozbiljna nedostatka. Prvi je relativno mala osetljivost zbog toga što je samo jedna od mogućih četiri grana aktivna. Drugi nedostatak je osetljivost mosta na promenu temperature. Aktivni otpornik, odnosno merna traka, po pravilu nije na istom mestu gde se nalaze ostali neaktivni otpornici, što neminovno dovodi do pojave temperaturne razlike, posebno kod dugotrajnih merenja. Vrednost otpora otpornika se menja sa temperaturom, što dovodi do pojave sistemske greške. Ova dva problema se rešavaju tako što se umesto jedne merne trake koriste dve.



$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

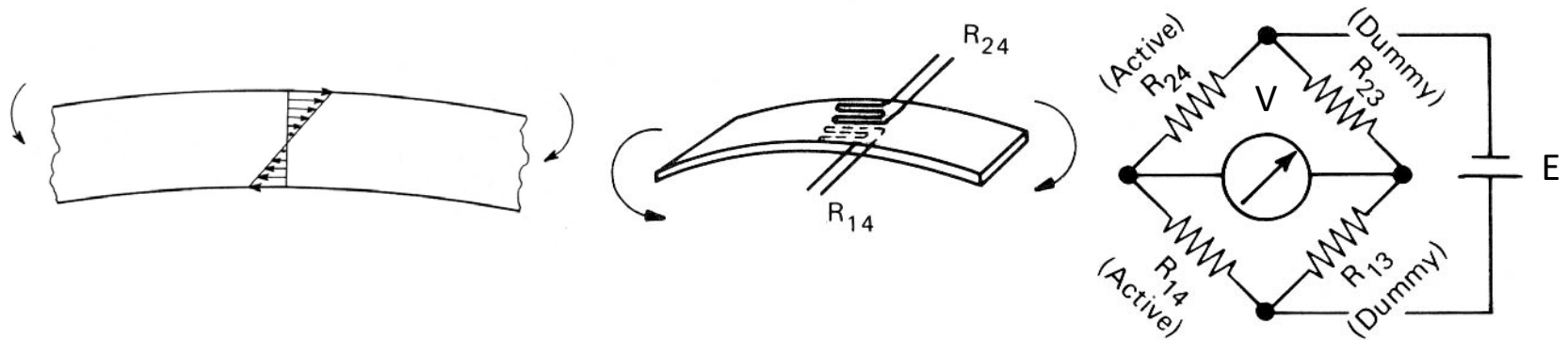


Napon V koji se meri voltmetrom u ovoj konfiguraciji definisan je relacijom:

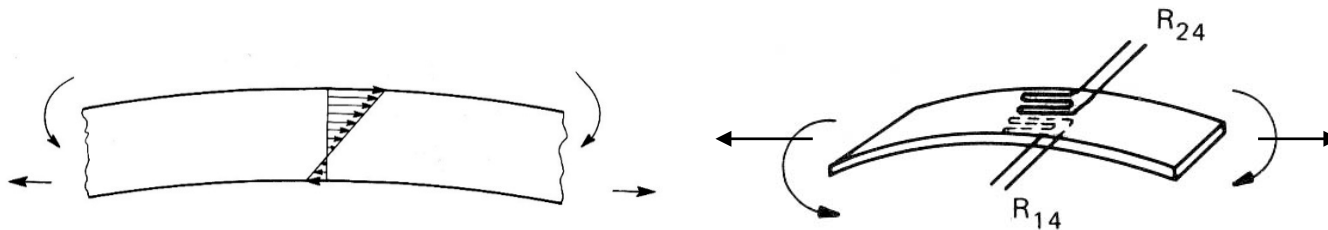
$$V = E \Delta R / 2R$$

Osetljivost ovakvog mosta je dva puta veća u ovom konkretnom slučaju, jer ista promena otpora generiše dva puta veći naponski odziv u odnosu na slučaj četvrtinskog mosta. Pored toga, aktivni otpornici se ugradjuju na deo tela senzora, blisko jedan uz drugi, tako da je temperaturna razlika zanemarljiva. Isto važi i za pasivne otpore. Ovakav most je prirodno temperaturno kompenzovan.

Slučaj I: Čisto savijanje



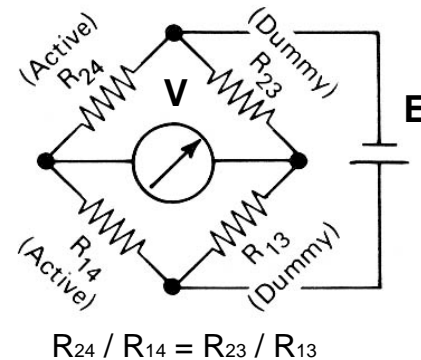
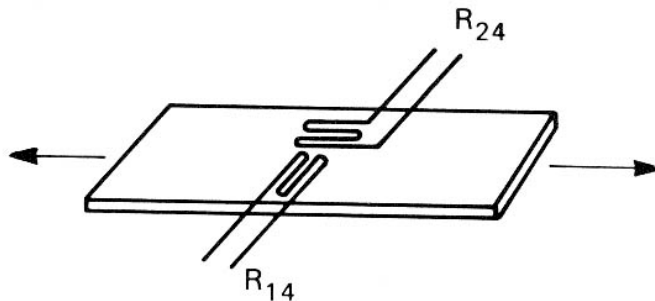
Slučaj II: Kombinovano savijanje i aksijalno opterećenje



$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

U ovom slučaju komponenta ekstenzije se automatski potiskuje. Ukoliko se na obe merne trake promena otpora ostvaruje u istom smeru, rast ili opadanje, ne dolazi do narušavanja ravnoteže mosta, jer nema ni narušavanja proporcije R_{24} / R_{14} . Da bi se ravnoteža narušila neophodno je da u jednoj grani postoji rast otpora a u drugoj opadanje, što se jedino dešava kod savijanja!!!

Slučaj II: Aksijalno opterećenje



U ovom slučaju imamo senzor na koji deluje tenzilno aksijalno opterećenje, sa dve merne trake zalepljene u pravcu kolinearnom sa pravcem aksijalnog opterećenja i upravnom na pravac aksijalnog opterećenja. Merna traka R24, kolinearna sa pravcem dejstva aksijalnog opterećenja povećava svoju otpornost na $R + \Delta R$, dok druga merna traka (R14) zbog kompresije smanjuje svoj otpor na $R - \nu \Delta R$ (Puasonov koeficijent) , pa prema tome napon V koji se meri voltmetar u ovoj konfiguraciji je definisan je relacijom:

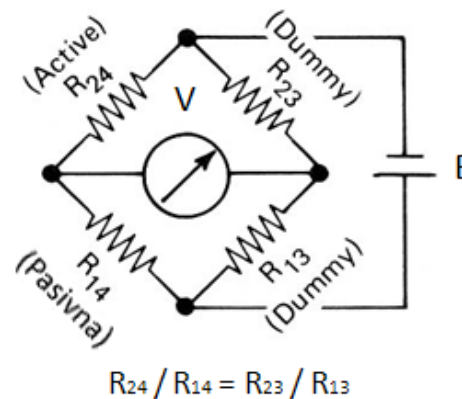
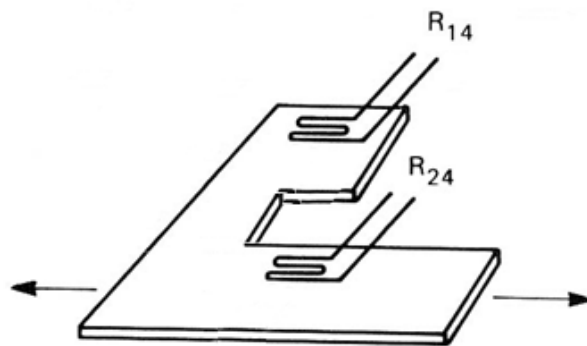
$$V = 1.3E\Delta R / 4R$$

Osetljivost ovog mosta je manja u odnosu na polumost koji je primenjen kod savijanja. Istovremeno, osetljivost ovog mosta je za 30% veća u odnosu na četvrtinski most, pri čemu postoji problem temperaturne kompenzacije.

Slučaj III: Temperaturno kompenzovani četvrtinski most

Kao treći slučaj ovde se navodi polumost sa samo jednom aktivnom trakom (R14 ili R24), odnosno trakom koja je ušvršćena na deo konstrukcije koji je izložen naprezanju, i drugom trakom (R24 ili R14) koja je učvršćena na mehanički neopterećeni deo konstrukcije - pasivna traka.

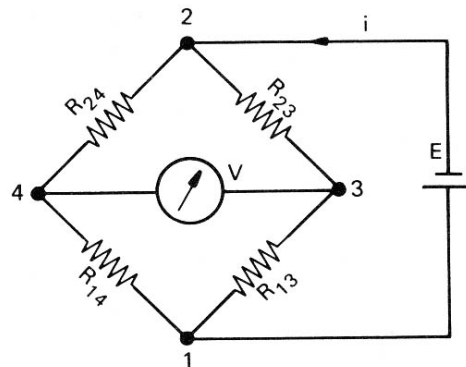
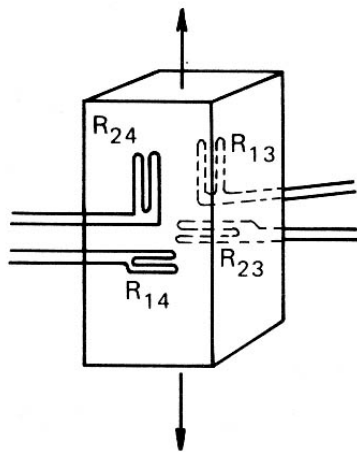
Ovakav merni most se u pretvaračkom smislu ponaša kao četvrtinski most. Za razliku od četvrtinskog mosta, ovaj most je temperaturno kompenzovan, Pasivna merna traka registruje sve dilatacije materijala koje dolaze kao posledica temperaturnih varijacija. Ona se učvršćuje što je moguće bliže aktivnoj mernoj traci, tako da se postiže jednakost temperaturnih varijacija za obe trake. Mehanizam Wheatstone-ovog mernog mosta poseduje osobinu da u ovakvoj konfiguraciji (polumost R14 i R24) potiskuje sve asimetrične sadržaje i reaguje samo na simetrične. Asimetričan sadržaj (u smislu komplementarnosti) je u ovom slučaju varijacija otpora obe merne trake izazvana temperaturom dok je uslovno simetričan sadržaj korisni signal, odnosno varijacija otpora trake izazvana deformacijom materijala pod dejstvom spoljašnje sile.



Puni most

U ovom slučaju sve grane su aktivne, čime se postiže najveća osetljivost i najbolja temperaturna kompenzacija u odnosu na ostale varijante Vitstonovog mosta.

Slučaj I: Aksijalno opterećenje

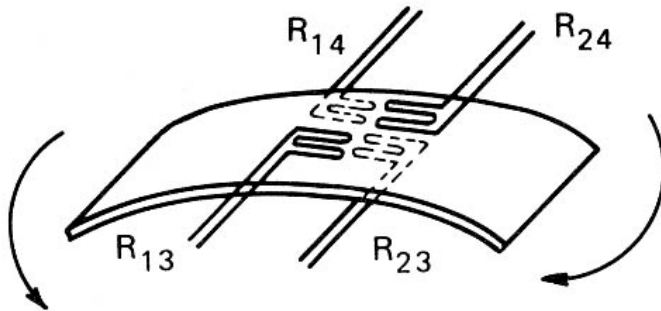


$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

Napon V koji se meri voltmetrom u ovoj konfiguraciji definisan je relacijom:

$$V = 1.3E\Delta R / 2R$$

Slučaj II: Čisto savijanje

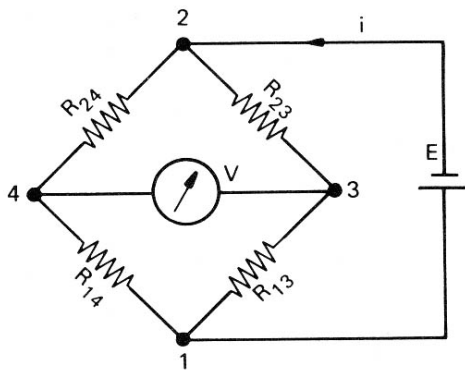


Napon V koji se meri voltmetrom u ovoj konfiguraciji definisan je relacijom:

$$V = E \Delta R / R$$

Ovakva merna konfiguracija je četiri puta osetljivija u odnosu na četvrtinski most uz istovremeno optimalno ispunjen uslov temperaturene kompenzacije – sve merne trake se nalaze u neposrednoj blizini na zajedničkoj osnovi.

Prethodno navedena relacija pokazuje još jednu vrlo značajnu činjenicu koja se mora uzeti u obzir kod projektovanja senzora: savijanje je pogodnije od aksijalnog opterećenja. Iz tog razloga treba telo senzora projektovati tako da se dejstvo sile koja se meri prevede u slučaj savijanja.



$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

Senzori sile – osnovni zahtevi

Senzor sile je mehatronski sklop koji u većoj ili manjoj meri ima uticaj mehaničko ponašanje objekta na koji se primenjuje. Jedan od osnovnih zadataka u projektovanju senzora sile je da se uticaj na objekat ili proces u okviru koga se primenjuje svede na najmanju moguću meru. U tom smislu potrebno je ostvariti sledeće zahteve:

- Minimalna pomeraji (mala popustljivost tela senzora; u izvesnim slučajevima matricu popustljivosti treba projektovati tako da poseduje neka specifična svojstva),
- Velika osetljivost i širok propusni opseg,
- Mala inercijalnost,
- Velika raspergnutost (malo preslušavanje izmedju osa u slučaju višekanalnog merenja),
- Velika termička stabilnost, i
- Jednostavan postupak kalibracije.

Ključne relacije u projektovanju senzora sile:

Osnova od koje se polazi kod projektovanja senzora sile baziranog na mernim trakama kao pretvaračkog elementa koji prevodi deformaciju kao neelektričnu veličinu u promenu otpora kao električnu veličinu, jeste relacija koja povezuje napon i deformaciju, odnosno Hukov zakon:

$$\sigma = E * (\Delta L / L_0) = E \varepsilon$$

Naponsko polje koje generiše sila čiji se intenzitet meri treba tako fokusirati da ono bude što ravnomernije u zoni u kojoj se lepi merna traka. Pored toga, intenzitet napona treba da bude takav da je ponašanje strukture linearno i da se istovremeno ostvari dovoljna rezerva koja će štititi strukturu senzora od mehaničkog loma u slučaju preopterećenja po bilo kojoj osnovi.

Vrednost napona koji generiše maksimalna sila za koju je projektovan senzor ne bi trebala da predje vrednost od 10% granice linearnosti. To praktično znači da se maksimalni napon treba da nadje u intervalu od 5 do 10 daN/mm², odnosno, 0.5 do 1*10⁸ N/m². Podizanjem ove granice povećava se osetljivost senzora, ali se istovremeno smanjuje njegova krutost, snižava sopstvena frekvencija (problematična dinamička merenja) i povećava rizik od havarije ulaskom u zonu plastičnog tečenja. Takodje, povećani naponi utiču na povećanje naprezanja spoja merne trake i tela senzora. U svakom slučaju, gornja granica koja se ne sme preći jeste napon od 2*10⁸ N/m². Ova granica je uslovljena graničnim vrednostima rada merne trake.

Poznavanjem granične vrednosti napona, lako se izračunava granična vrednost deformacije, koja u slučaju legiranog čelika iznosi:

$$\varepsilon = \sigma / E = 10 \text{ e}8 / 2.1 \text{ e}11 = 476 * 10\text{e}(-6)$$

odnosno 467 $\mu\text{m}/\text{m}$ ($\mu\varepsilon$) ili približno 500 $\mu\varepsilon$, a nikada preko 1000 $\mu\varepsilon$. U oba slučaja merna traka će raditi u zoni linearnosti od 0.1%.

Koristeći relaciju koja povezuje deformaciju sa relativnom promenom otpornosti merne trake:

$$\Delta R / R = Gf \varepsilon = 2\varepsilon$$

dolazi se do korespodentne granične vrednosti promene otpora merne trake, koja iznosi $\Delta R / R = 1000 * 10\text{e}(-6)$, odnosno $\Delta R / R = 2000 * 10\text{e}(-6)$ ako se dozvoli gornja granična vrednost napona od 20 daN/mm².

U slučaju četvrtinskog mosta, ova relativna promena otpornosti merne trake generisaće maksimalnu potencijalnu razliku u mernoj grani Witstonovog mosta sa jediničnom naponskom pobudom ($E=1\text{V}$), odnosno biće generisan naponski signal od $V = E\Delta R / 4R = 1 * 1000 * 10\text{e}(-6) / 4 = 0.00025 \text{ V}$ odnosno +/- 0.25 mV, ukoliko se uzme u obzir smer deformacija.

Na osnovu prethodno izvedene vrednosti naponskog signala, može se dalje definisati zahtev za izgradnju odgovarajućeg sklopa kondicionera.

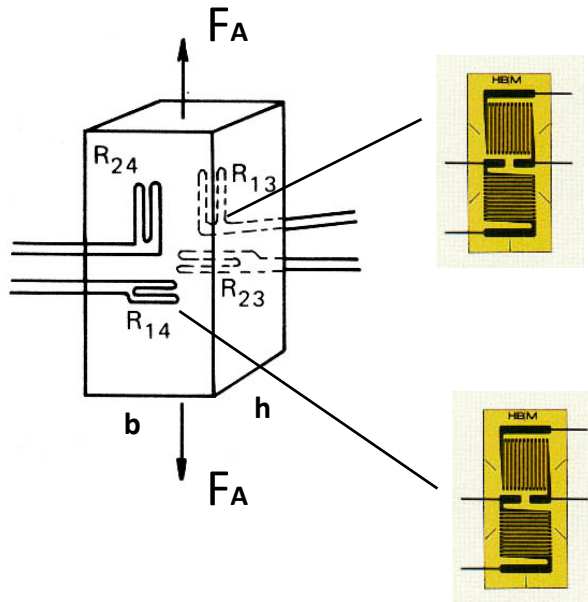
Iz prethodne analize mogu se izvući tri vrlo značajna zaključka. Prvi je da uvek kada je to moguće treba primenjivati konfiguraciju punog fleksionog mosta, jer se tako generiše 4 puta veći naponski odziv za isti intenzitet deformacije tela senzora. Drugi je da se naponom napajanja mernog mosta mosta može povećati naponski odziv. Treći zaključak, koji se takodje, nameće jeste da se povećanje naponskog odziva može ostvariti i povećanjem mehaničke osetljivosti tela senzora kroz povećanje dozvoljene granične vrednosti napona u zoni u kojoj se lepi merna traka.

Uzimajući sve prethodno navedeno, može se izvesti zahtev za osetljivošću kondicionera. Ukoliko se radi sa punim fleksionim mostom i ukoliko se dozvoli gornja naponska granica od 20 daN/mm², onda sledi da će maksimalni naponski signal koji generiše ovakav senzor iznositi 2mV za slučaj pobude mosta sa naponom od 1V. Upravo ova vrednost, **2mV/V predstavlja važeći industrijski standard osetljivosti kondicionera za rad sa mernim trakama.**

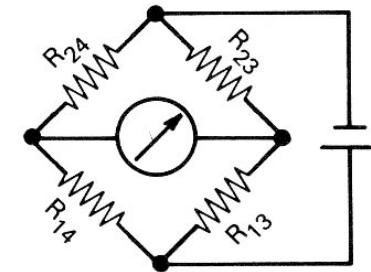
U cilju povećanja robusnosti, mnogi proizvođači senzora povećavaju napon pobude mosta, tako da se danas u industrijskoj praksi sreću senzori koji rade sa 10V napajanja mosta. Istovremeno, da bi se sprečila prevelika termička disipacija, primenjuju se merne trake nominalnog otpora od 1kOhm. Ovim se postiže da senzor ima značajno veću naponsku rezervu do granične vrednosti loma, čime se štiti senzor od mogućih oštećenja u radu ili rukovanju, a u određenim situacijama sprečavaju i moguće havarije okolne opreme, jer senzor sile nema samo funkciju senzora već i nosećeg elementa zbog toga što tok sile koja se meri, u celosti ili delimično prolazi kroz telo senzora. Ipak, snižavanje maksimalnog napona treba primenjivati sa merom, jer premale vrednosti napona stvaraju rizik od poremećaja tipa strukturnog (interkristalnog) šuma koji generiše materijal iz koga je izradjen senzor.

Jednoosni senzori sile

Senzor sile baziran na merenju aksijalne deformacije



Konfiguracija punog mosta

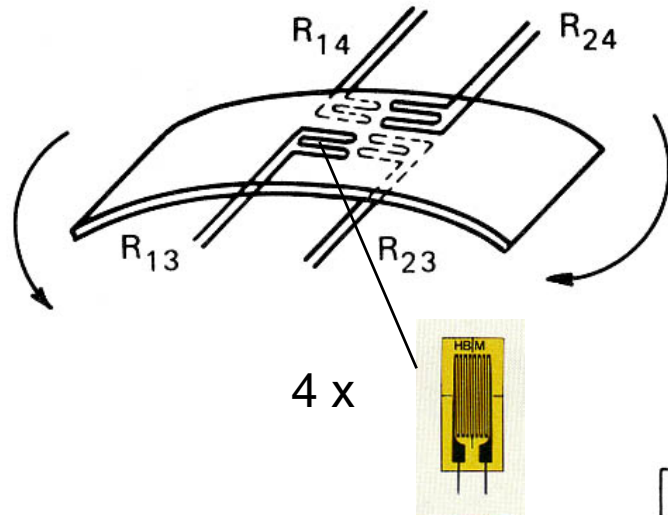


$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

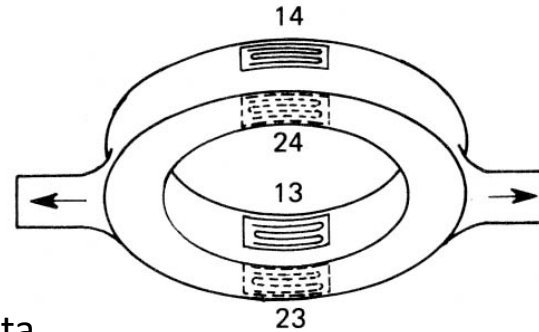
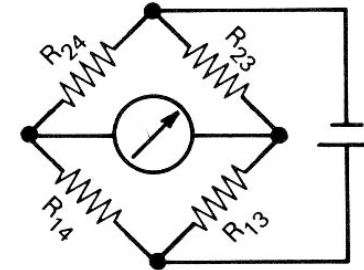
$$F_A = E * \epsilon_A * b * h.$$

AXIAL STRAIN equals axial stress divided by Young's Modulus. $\epsilon_A = \sigma_A / E$; where axial stress (σ_A) equals the axial load divided by the cross-sectional area; $\sigma_A = F_A / A$. The cross-sectional area for rectangles equals $(b \times h)$. Therefore, strain gages used in axial configurations can be used to determine axial loads: $F_A = E \epsilon_A b h$.

Senzor sile baziran na merenju deformacije na savijanje



Konfiguracija punog mosta



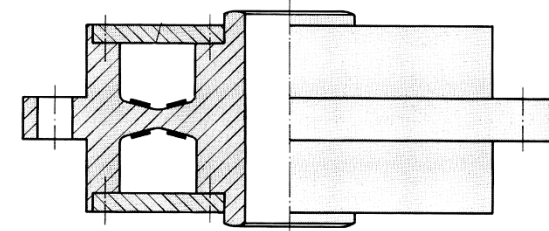
Prstenasti oblik tela senzora za merenje aksijalne sile

Prstenastim ili membranskim oblikom tela senzora konvertuje se aksijalna komponenta napona u savijanje, a onda se primenom punog mosta dobija najveća osetljivost i termička stabilnost. Moment savijanja se izračunava iz sledeće relacije:

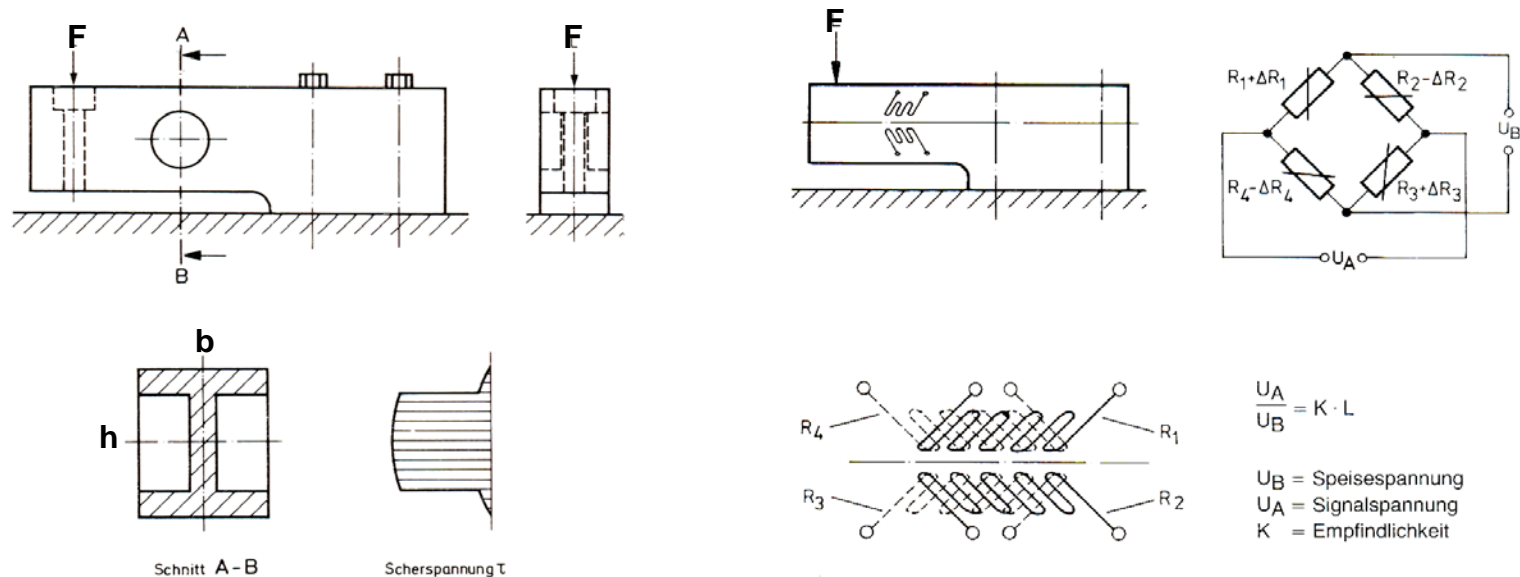
$$M_B = E * \epsilon_B * W.$$

Moment inercije za kvadratni presek iznosi $W = bh^2 / 6$, gde je sa b označena širina preseka. Iz geometrije tela senzora izvodi se relacija koja prevodi moment u aksijalnu silu.

Membransku oblik tela senzora za merenje aksijalne sile



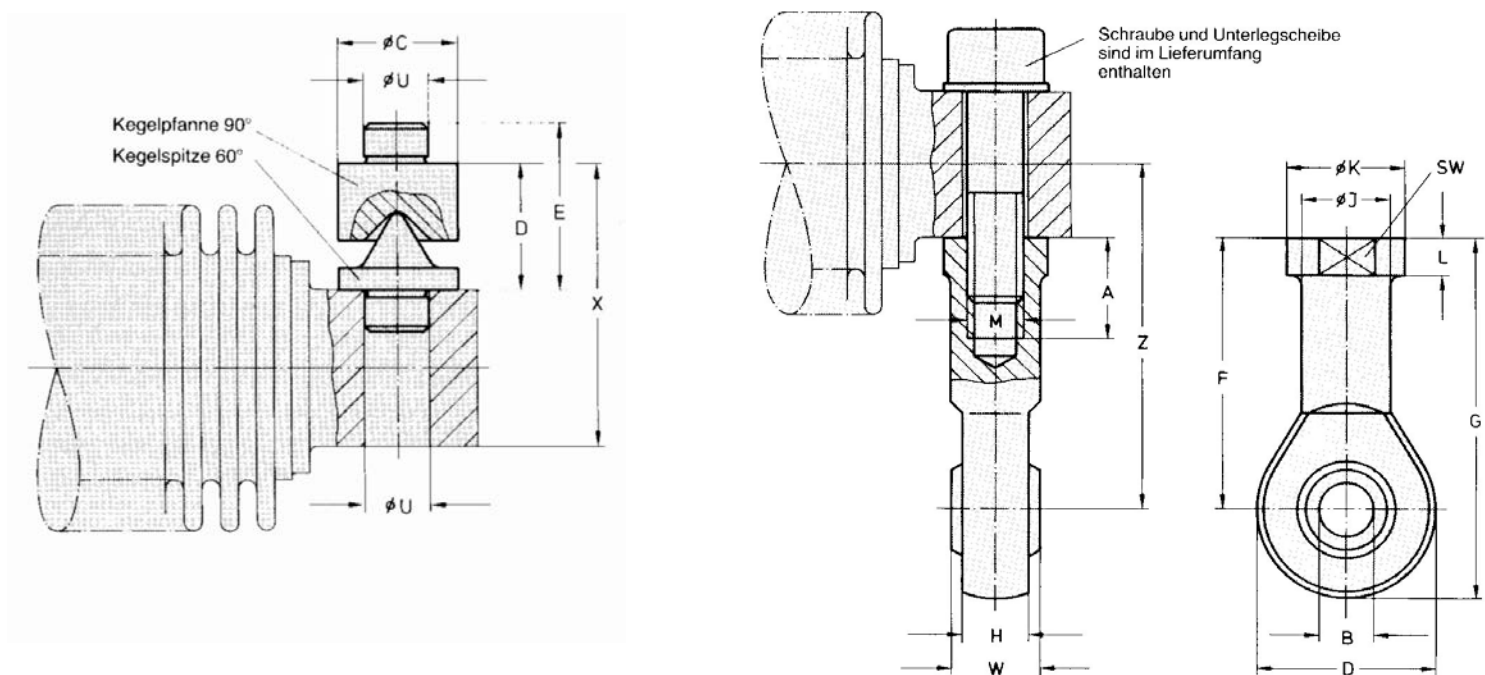
Senzor sile baziran na merenju tangencijalnog napona



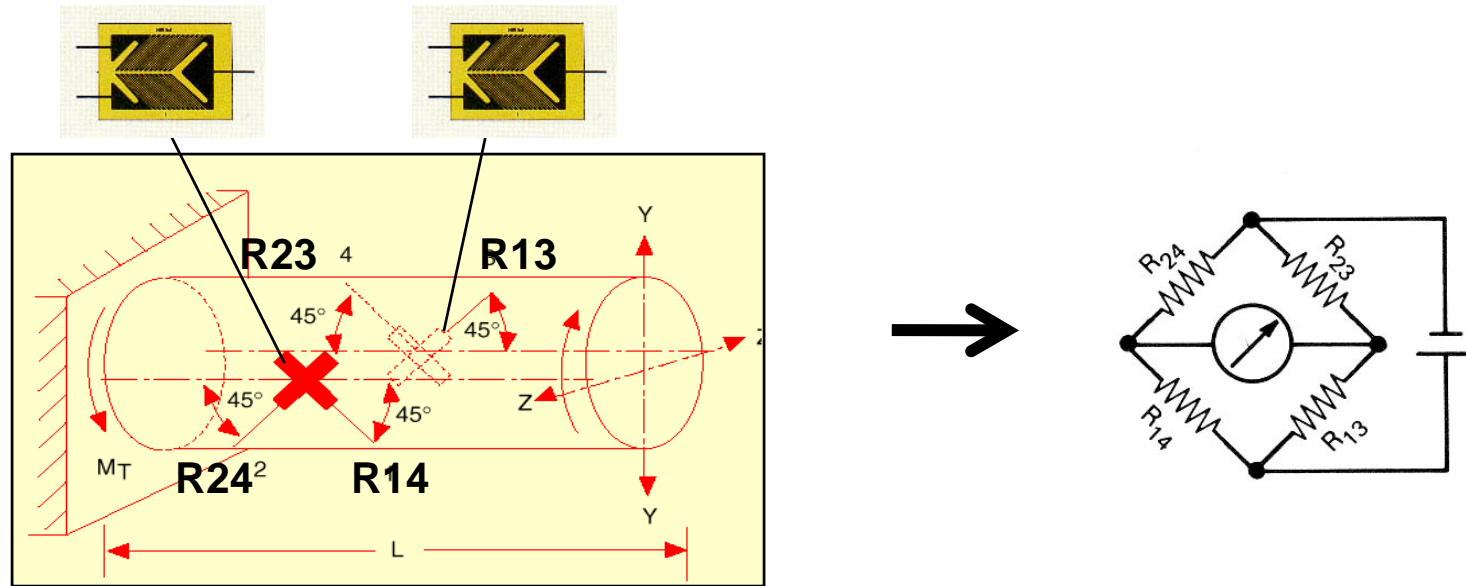
Uniformno polje tangencijalnog napona blizu neutralne ose tela senzora može se iskoristiti za polaganje mernih traka. Tangencijalni napon se fokusira (intenzivira) upuštanjem dve rupe kao što je to prikazano na crtežu iznad. Na ovaj način se dobija senzor relativno velike krutosti i tačnosti. Aksijalne sile u horizontalnoj ravni i momenti se u potpunosti potiskuju

SHEAR STRAIN equals shear stress divided by modulus of shear stress. $\gamma = \tau / G$; $G = 0.5 E / (1 + \mu)$. Shear stress (τ) equals (Q), the moment of area about the neutral axis multiplied by the vertical load (F) and divided by the thickness (b) and the moment of inertia (I); $\tau = F Q / bI$. Both the moment of area (Q) and the moment of inertia (I) are functions of the specimen's cross-sectional geometry. The shear strain (γ) is determined by measuring the strain at a 45° angle: $\gamma = 2 \times \varepsilon @ 45^\circ$. Therefore, strain gages used in a shear strain configuration can be used to determine vertical loads (commonly referred to as a shear beam load cell: $F = G \gamma bI/Q$; for rectangles only $Q = b h^2 / 8$ and $I = b h^3 / 12$, that gives $F = 2 E \gamma b h / 3(1 + \mu)$).

Prenos sile koja se meri na telo senzora je delikatan zadatak. Odgovarajućim konstruktivnim rešenjima ostvaruje se neka vrsta mehaničke filtracije, odnosno uklanjanje neželjenih komponenti vektora sile ili generisanje novih komponenti vektora sile. Neka od niza mogućih rešenja se navode na crtežu ispod.



Senzor za merenje momenta uvijanja



Dva para mernih traka u obliku riblje kosti se ugradjuju na dve opozitne strane osovine u cilju eliminacija aksijalnih i transferzalnih sila kao i momenata savijanja u obe ravni. Ovakva merna konfiguracija reaguje samo na komponentu momenta uvijanja.

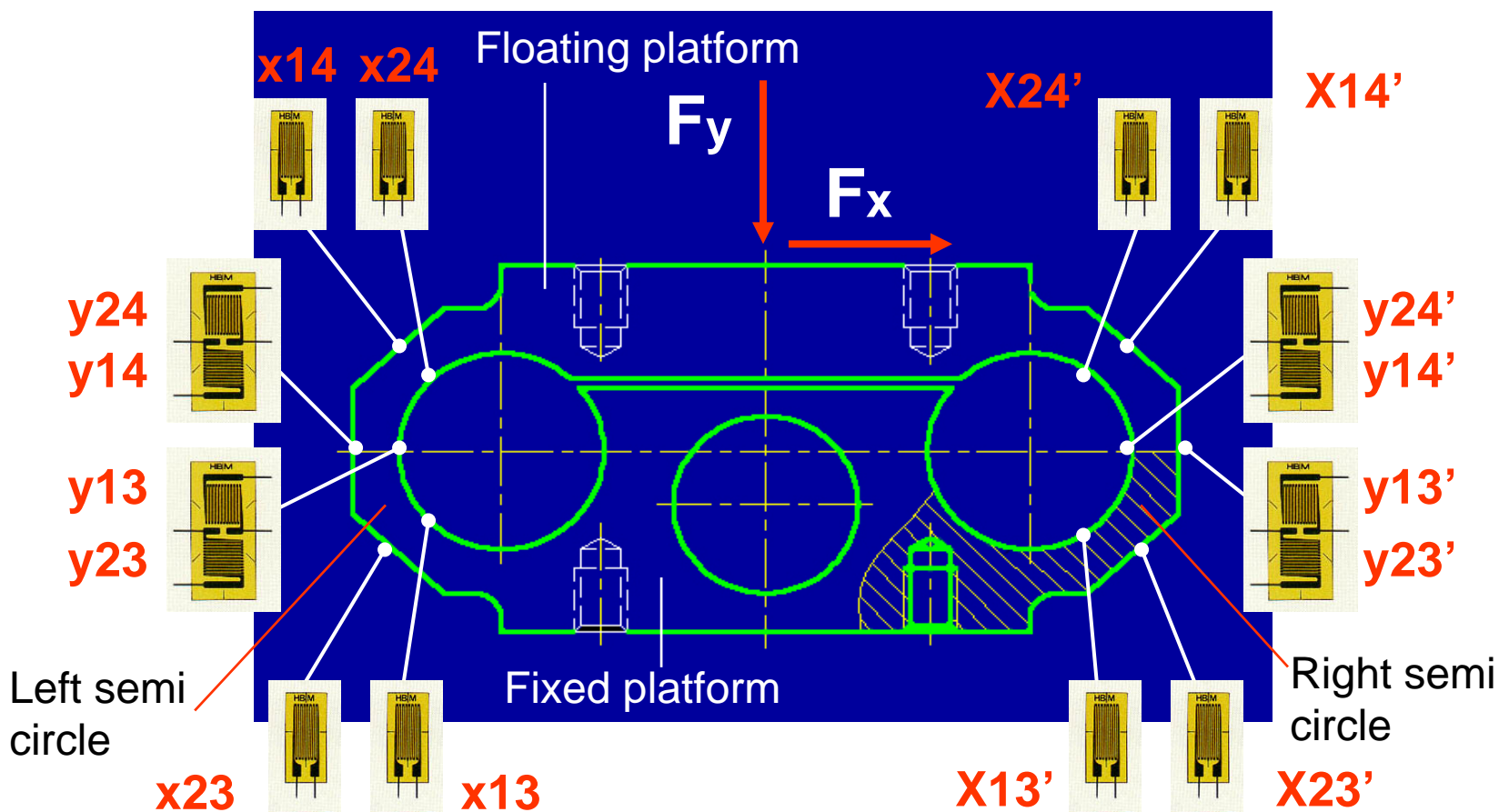
TORSIONAL STRAIN equals torsional stress (τ) divided by torsional modulus of elasticity (G). $\gamma = 2 \times \varepsilon @ 45^\circ = \tau / G$; $\tau = M_T (d/2) / J$, where torsional stress (τ) equals torque (M_T) multiplied by the distance from the center of the section to the outer fiber ($d/2$), divided by (J), the polar moment of inertia. Strain gages can be used to determine torsional moments as shown in the equation: $M_T = 2 \tau J / d = 2 \gamma G J / d$ (for solid circular shafts only, $J = \pi d^4 / 32$, torsional moment equals: $M_T = 0.125 E d^3 \gamma / (1 + \mu)$).

Višeosni senzori sile

Višeosni senzori sile omogućavaju simultano merenje većeg broja komponenti generalizovanog vektora sile, koji u opštem slučaju ima 6 ortogonalnih komponenti, tri sile i tri momenta.

Osnovni problem ovde jeste raspredanje osa. Cilj je da senzor na svom izlazu generiše međusobno nespregnute podatke o pojedinim komponentama generalizovanog vektora sile. Ovaj problem se može rešiti na tri načina: 1)mehaničko raspredanje, 2)električno raspredanje i 3)softversko raspredanje.

Electromechanically decoupled load cell for 2 component force vector measurement

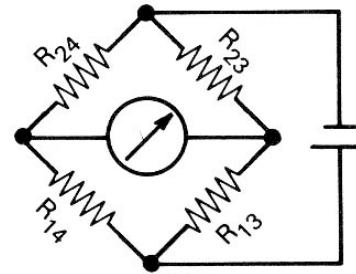


When sensor body is loaded by F_x component only, left and right semi circles are subjected to bending stress only. No single tension/compression stress exist in any segment of semi circles.

It is convenient to measure bending strain on angled segments of semi circles (one can recognize 4 angled segments).

Strain gages are located as it is shown in Figure on previous page. Electrical wiring is as follows:

Electrical wiring: $R_{24} = x_{24} + x_{24}'$;
(doubled bridge -> doubled sensitivity)



Bridge balance condition:

$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

When sensor body is loaded by F_y component only, both semi circles are subjected to bending and tension/compression stress in combination.

Vertical segments are convenient to measure tension/compression strain (there are 2 vertical segments).

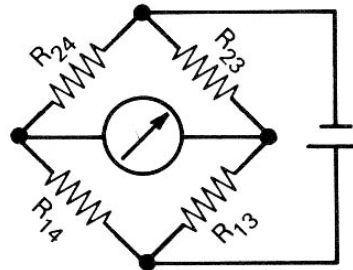
Strain gages are located as it is shown in Figure on previous page. Electrical wiring is as follows:

Doubled full bridge configuration for **y-component** measurement

(due to specific connection of strain gages, bending component is electrically canceled out)

Electrical wiring: $R_{24} = y_{24} + y_{24}'$;

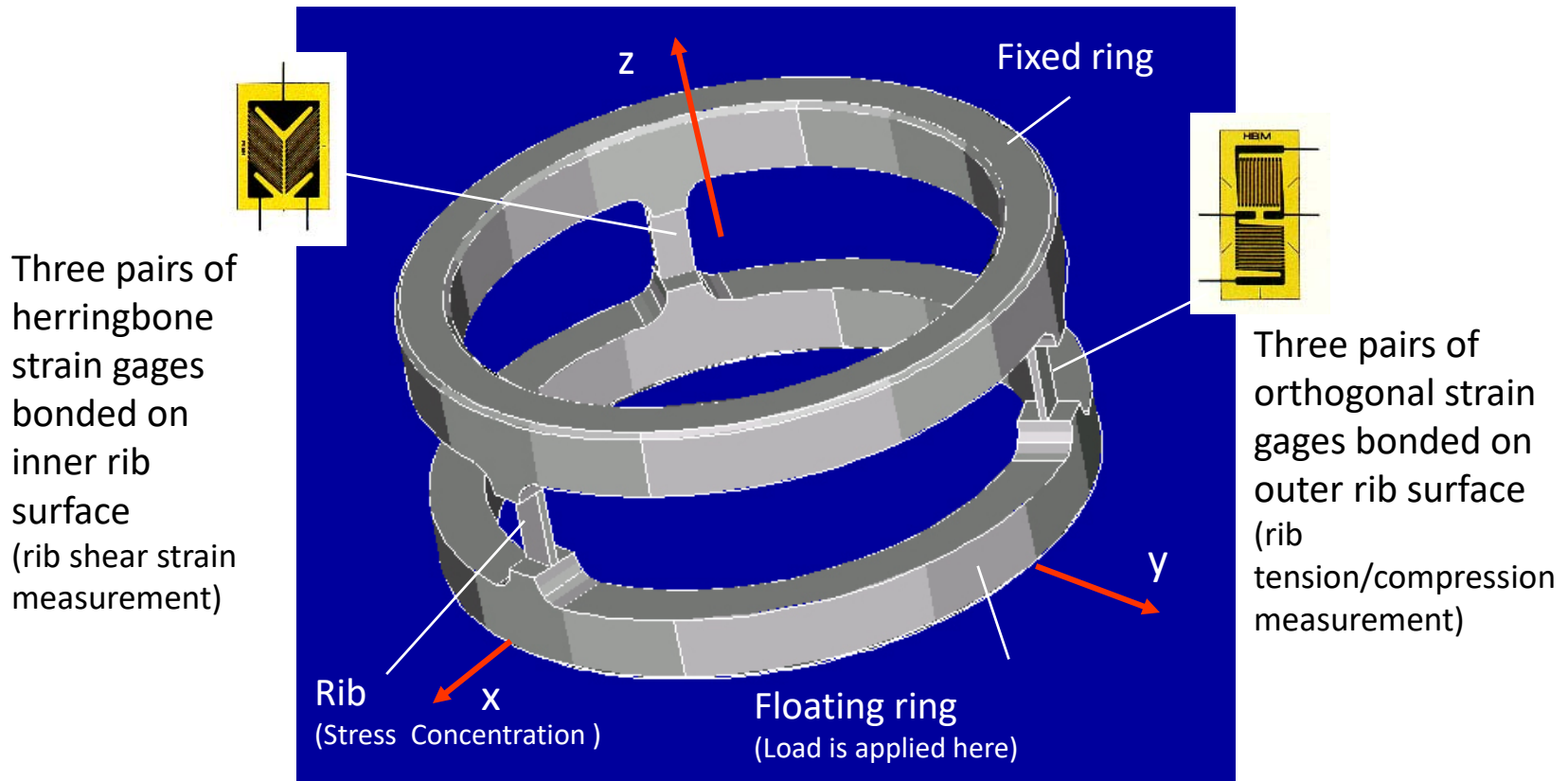
(doubled bridge -> doubled sensitivity)



$$R_{24} / R_{14} = R_{23} / R_{13}$$

Imperfections in strain gages location, strain gages wiring, as well as, sensor body manufacturing, can produce cross talk between the channels, i.e., coupling of F_x and F_y readings.

Software decoupled load cell for 6 component generalized force vector measurement



6 half- bridge strain gage configurations generate 6 component vector of linearly uncoupled strain information that represents unique mechanical response of sensor body to applied load.

Generalisani vektor sile koji deluje na plivajući prsten:

$$F = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z]^T$$

Vektor naponskog odziva senzora (6 polumosta mernih traka):

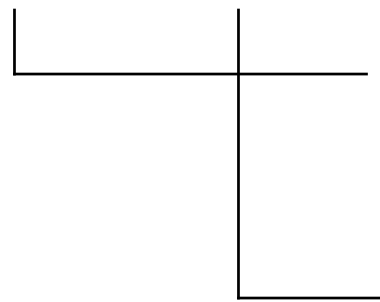
$$V = [V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad V_4 \quad V_5 \quad V_6]^T$$

Jednačina senzora koja definiše preslikavanje vektora napona u vektor sile:

$$V = HF + B$$

Jednačina senzora koja definiše preslikavanje izmedju napona i sile za slučaj inicijalnog debalansa

$$F = H^{-1}(V - B)$$

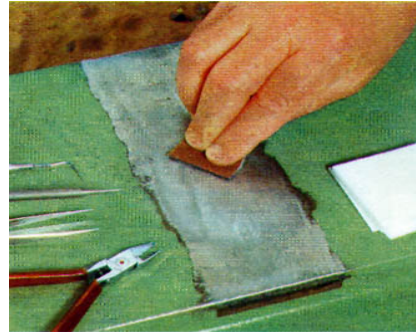


Transformaciona matrica
senzora

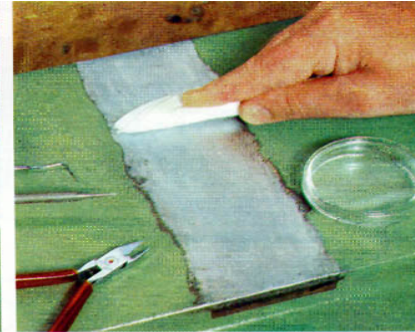
$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{61} & \cdots & h_{66} \end{bmatrix}$$

Inicijalni debalans senzora (naponski izlaz u
neopterećenom stanju)

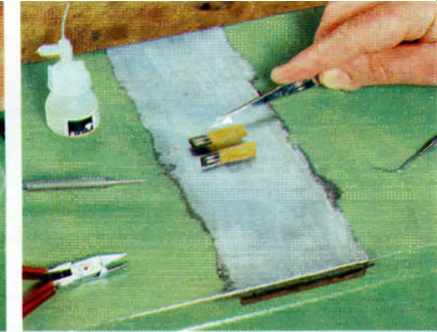
Primer praktičnog rada sa mernim trakama:



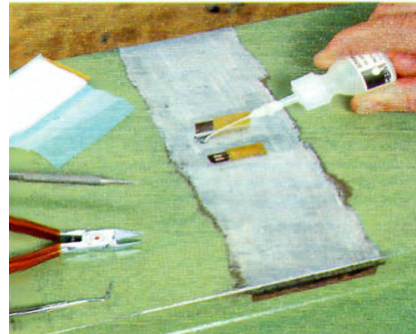
1. Roughening of the application area



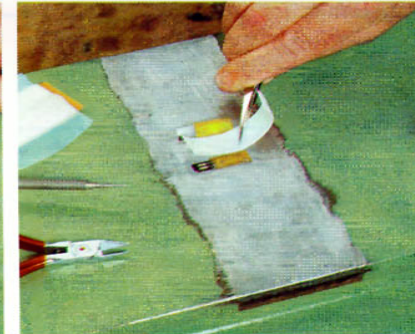
2. Cleaning of the application area



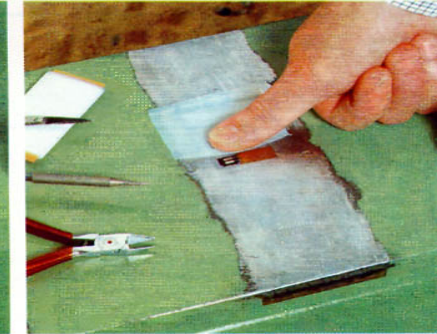
3. Positioning of the strain gauges with tape



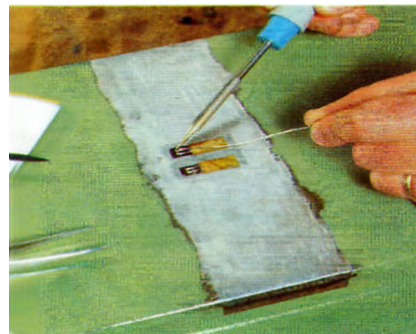
4. Applying the adhesive



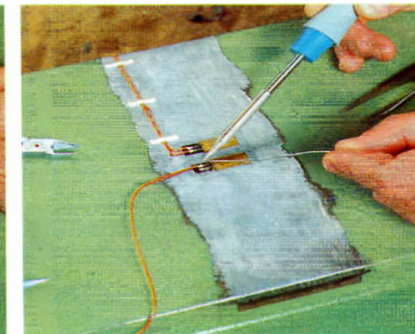
5. Spreading the adhesive



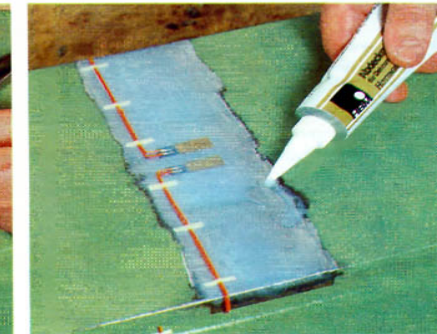
6. Pressing the strain gauges



7. Soldering the strain gauge ribbons

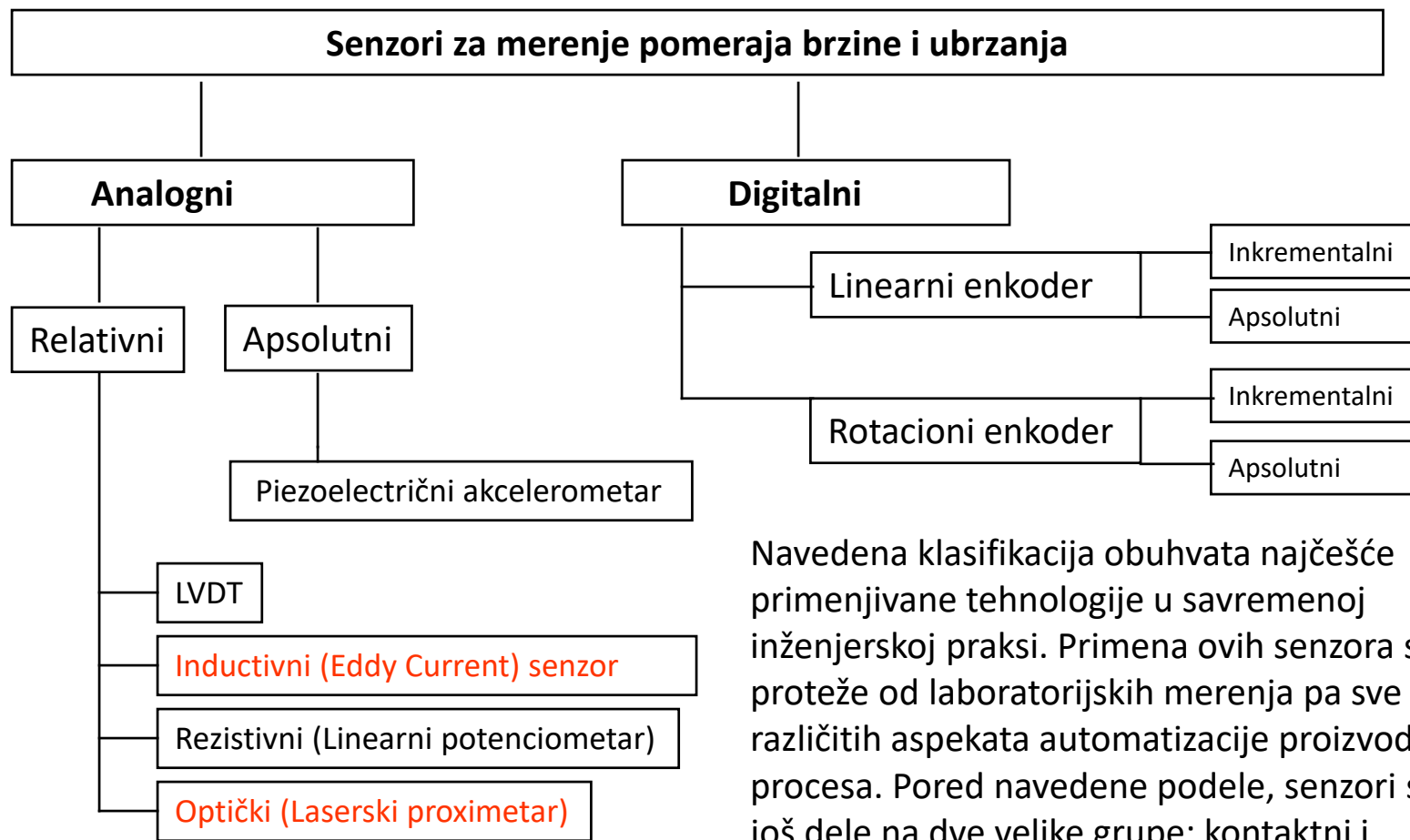


8. Soldering and fixing the cables



9. Covering the measurement point

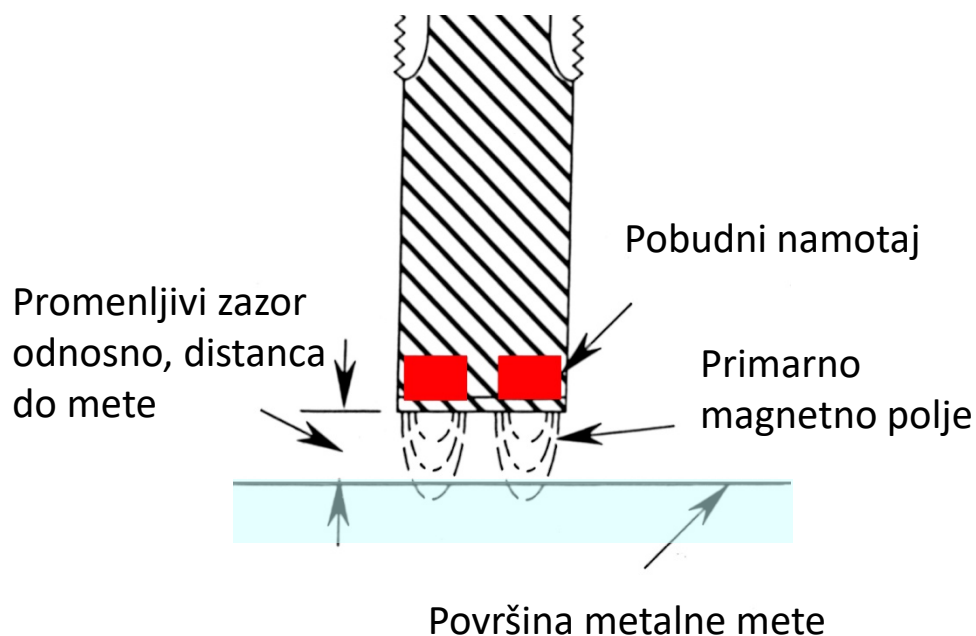
b3.2 Merenje pomeraja, brzine i ubrzanja



Navedena klasifikacija obuhvata najčešće primenjivane tehnologije u savremenoj inženjerskoj praksi. Primena ovih senzora se proteže od laboratorijskih merenja pa sve do različitih aspekata automatizacije proizvodnih procesa. Pored navedene podele, senzori se još dele na dve velike grupe: kontakti i beskontaktni (beskontaktni su označeni crvenom bojom u navedenoj tabeli).

Senzori pomeraja: Induktivni senzor

Induktivni senzor je beskontaktni senzor koji registruje prisustvo metalne mete. On se sastoji od pločastog solenoida kroz koji se propušta visokofrekventna pobudna struja. Ova pobudna struja generiše primarno magnetno polje, koje dalje indukuje vrtložne struje u površinskim slojevima objekta čija se distanca meri. Indukovane vrtložne struje generišu sekundarno magnetno polje koje se superponira sa primarnim.



Superpozicija magnetnih polja stvara poremećaj u pobudnom kolu solenoida. Regulaciono kolo pobude solenoida kompenzuje ovaj poremećaj. Merenjem intenziteta kompenzacione komponente, istovremeno se meri i distanca do metalne mete. Mehanizam nije linearan i primenjuju se posebne tehnike za njegovu linearizaciju i temperaturnu.

Merni opseg

Induktivni merni senzori generalno imaju mali merni opseg, tipično nekoliko milimetara (maksimalno 10 do 15 mm). Merni opseg zavisi od veličine namotaja senzora i elektromagnetskih i elektroprovodnih karakteristika materijala mete. Ako se sa Sn označi merni opseg sa kojim se operiše kada se radi sa mekim čelikom, merni opseg treba korigovati sa 0.75 za slučaj nerdjajućeg čelika, 0.5 za mesing, 0.4 za aluminijum i 0.35 za bakar.

Frekventni opseg

Induktivni senzori su pogodni za rad sa stacionarnim metama jer nemaju graničnu vrednost za niske frekvencije. Gornja granična frekvencija je određena dinamičkim karakteristikama solenoida i njegovog pobudnog kola, kao i od pobudne frekvencije, koja može da bude nekoliko stotina kHz (manji prečnici solenoida se pobudjuju većim frekvencijama).

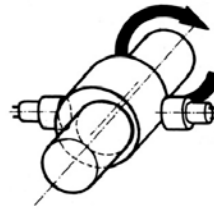
Pošto se merenja odvijaju na beskontakni način, ova vrsta senzora nema uticaja na objekat čija se distanca meri.

Induktivni senzor ne registruje prisustvo nemetalnih meta. Ovo znači da je induktivni senzor otporan na prisustvo različitih nečistoća. Prisustvo različitih nemetalnih prevlaka se takodje ne registruje ovom vrstom senzora, što se može efektno iskoristiti u mnogim praktičnim situacijama.

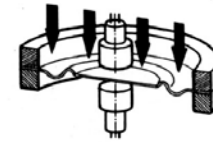
Neki od tipičnih slučajeva primene induktivnih senzora

Pored merenja pomeraja, kao statičke veličine, ovi senzori se vrlo uspešno primenjuju za merenje brzine, prisustva, frekvencije oscilovanja/obrtnja, pritiska, sile, ekscentriciteta i drugih fizičkih veličina koje su spregnute sa pomerajem.

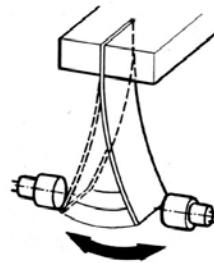
Kada se kod induktivnih senzora ugradi kolo električnog komparatora na njegovom izlazu, ova vrsta analognih senzora se pretvara u digitalni senzor prisustva, o čemu se govori u modulu b2.2.



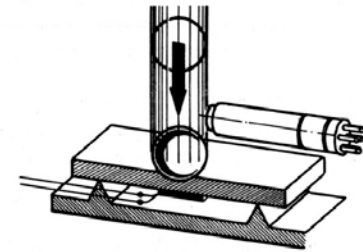
Continuous measurement of the movements of a shaft, using an eccentric piece.



Arrangement for measuring the position of a thin diaphragm.



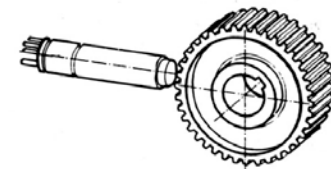
Frequency and amplitude measurement on a leaf spring (tuning fork).



Deriving a trigger pulse in a falling ball test.



Contact-free and reaction-free measurement of the position or motion of a pendulum.

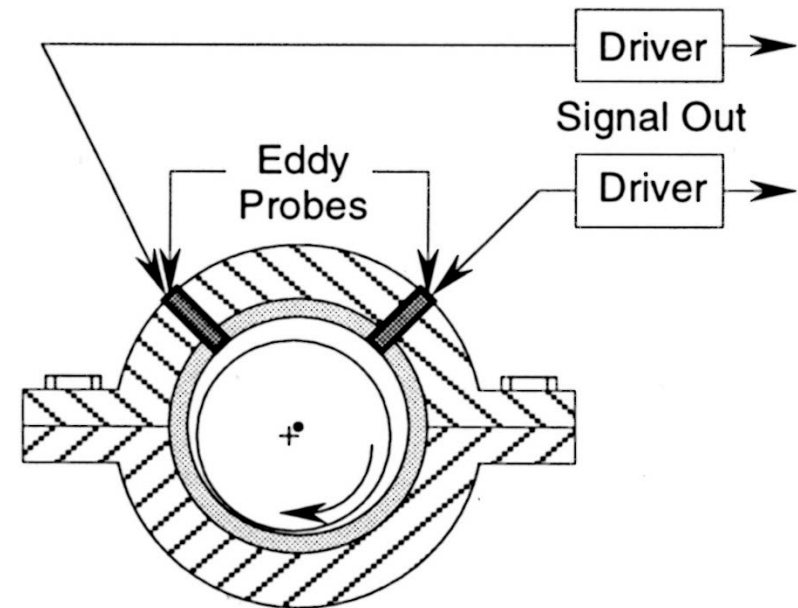


Measuring the movement of a gear wheel for speed measurements, angle marking and so on.

Merenje radijalnog i aksijalnog udara i merenje orbite rotora

Ukoliko se induktivni senzor ugradi u kućište ležaja, recimo ležaja glavnog vretena mašine alatke, moguće je vrlo precizno merenje aksijalnog i radijalnog udara, kao i aksijalnog pomeranja vretena izazvanog temperaturnim promenama u sklopu njegovog uležištenja.

Ukoliko se ugrade dva induktivna senzora pod uglom od 90 stepeni, onda je moguće merenje vibracija vretena, odnosno njegove orbite po kojoj se kreće unutar sistema uležištenja.

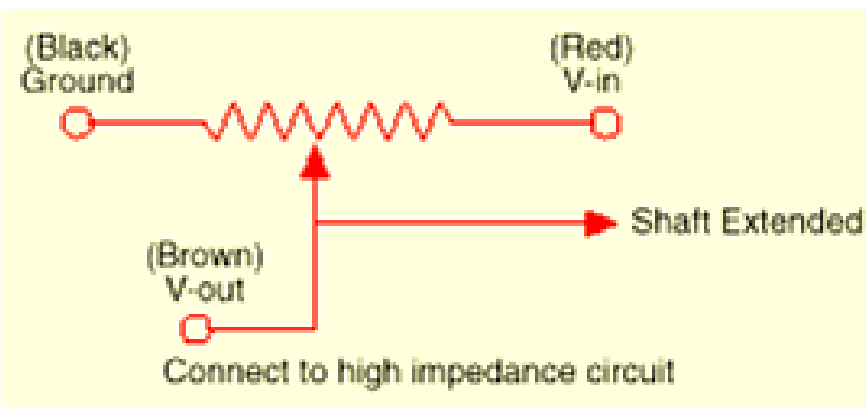


Linearni potencijometar

Linearni potencijometar je senzor koji se koristi za merenje relativnih pomeraja kontaktnom metodom. Senzor se sastoji iz linijskog nosača koji je oslojen provodnom plastikom precizno definisane otpornosti i kontaktnog klizača koji je povezan sa vodjicom. Kretanjem klizača menja se naponski potencijal u mernom kolu, čime se registruje pomeraj sa velikom preciznošću. Merni opseg se kreće u intervalu od nekoliko centimetara do nekoliko metara. Tipična linearnost je oko 1% mernog opsega, a radni vek u intervalu $10^7 - 10^9$ ciklusa.

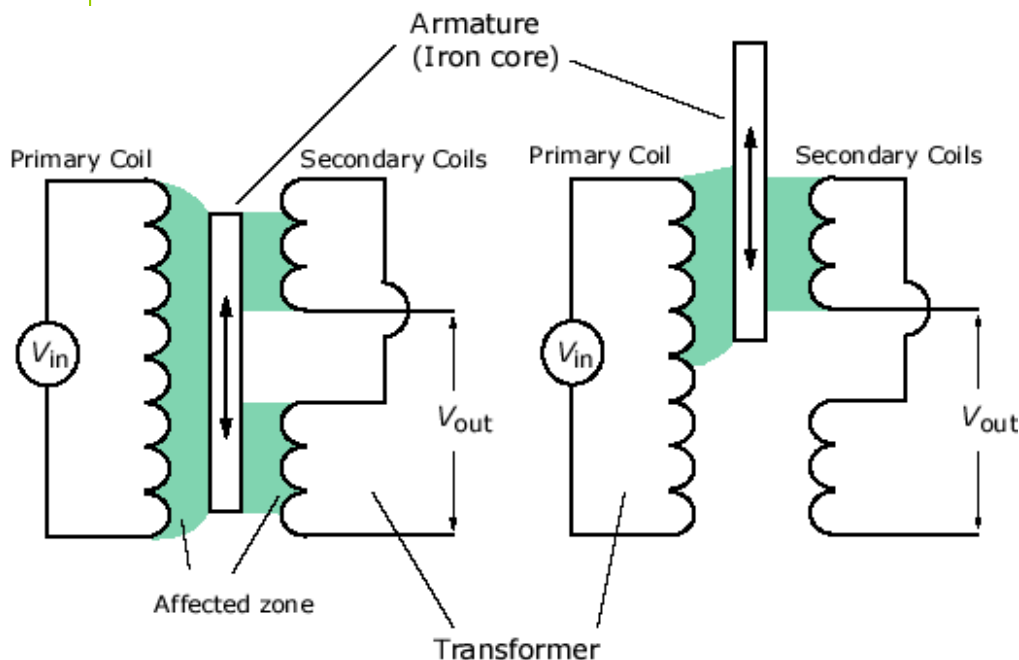
Korišćenjem istog principa grade se odgovarajući ugaoni potencijometri koji se u izvesnim situacijama koriste u robotici i sličnim mehanizmima koji imaju ugaone zglobove.

Zbog kontaktnog principa merenja, ova vrsta senzora je pogodna za statička i kvazistatička merenja.



LVDT - linearni diferencijalni transformator

Statička i kvazistatička merenja se analogno linearnom potenciometru, mogu meriti posebnim linearnim diferencijalnim transformatorom, za koji je odomaćen termin LVDT (*Linear Voltage Differential Transformer*). I u ovom slučaju se radi o kontaktnom senzoru, ali se nešto većom robusnošću od potenciometra. Transformator se sastoji iz primarnog namotaja, dva sekundarna namotaja i magnetnog jezgra.



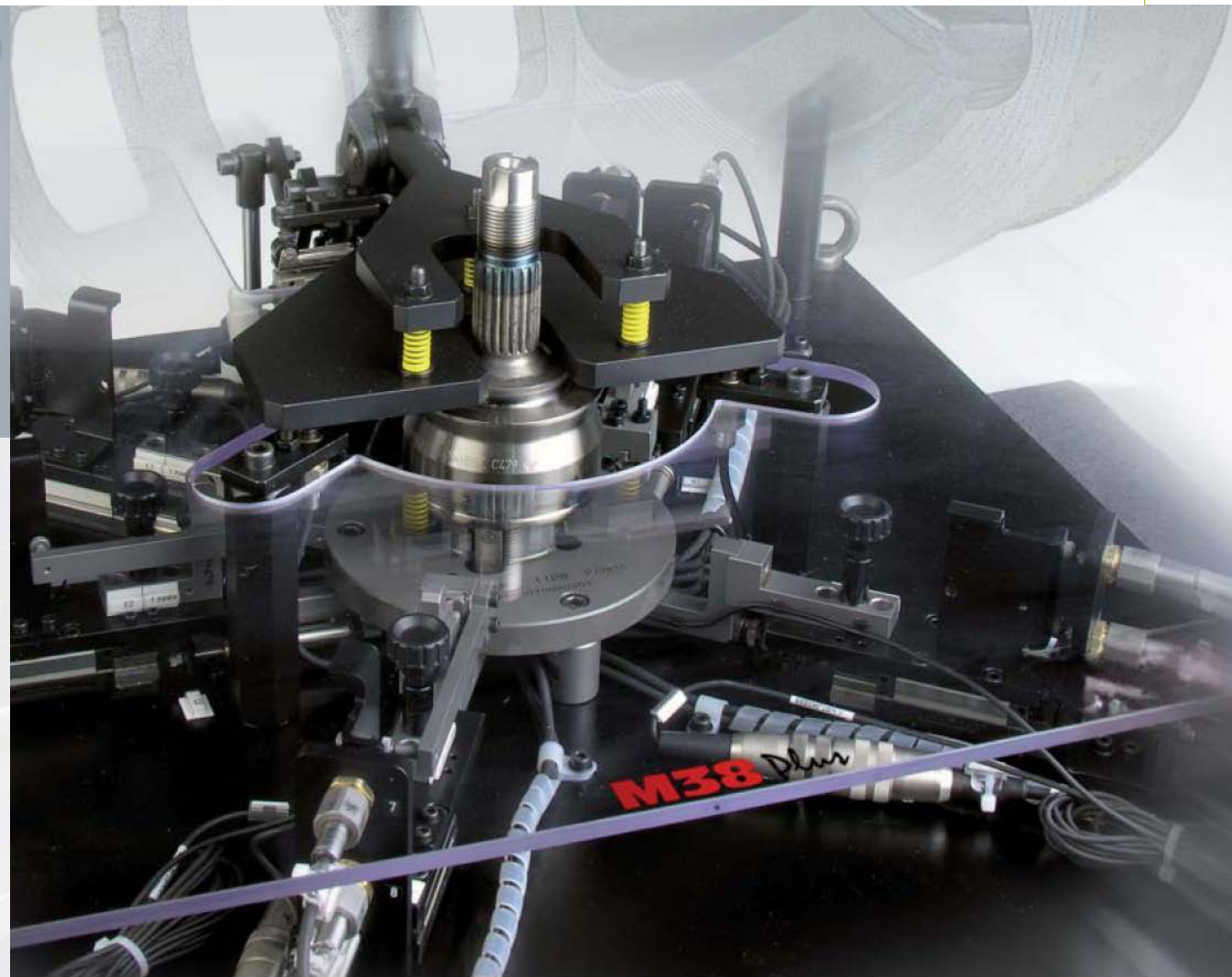
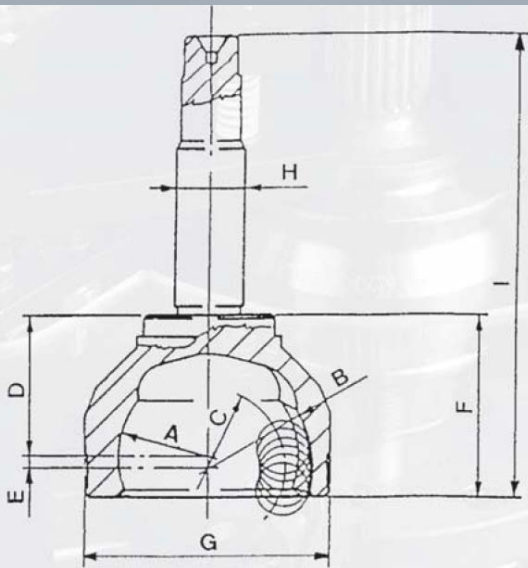
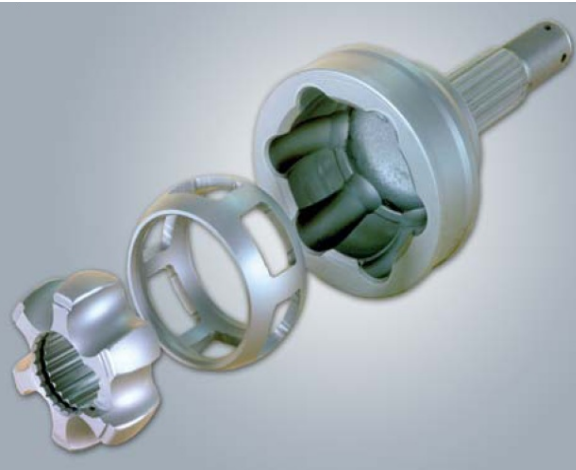
Primarni namotaj se pobudjuje naizmjeničnom strujom. Pobuda primara indukuje struju u sekundarnim namotajima. Intenzitet ove struje je linearno proporcionalan broju navojaka sekundarnog namotaja koji su u zahvatu pokretnog magnetnog jezgra. Pomeranjem objekta čija se distanca meri, pomera se i jezgro koje je vezano za njega, čime se menja i indukovani napon na izlazu LVDT senzora.

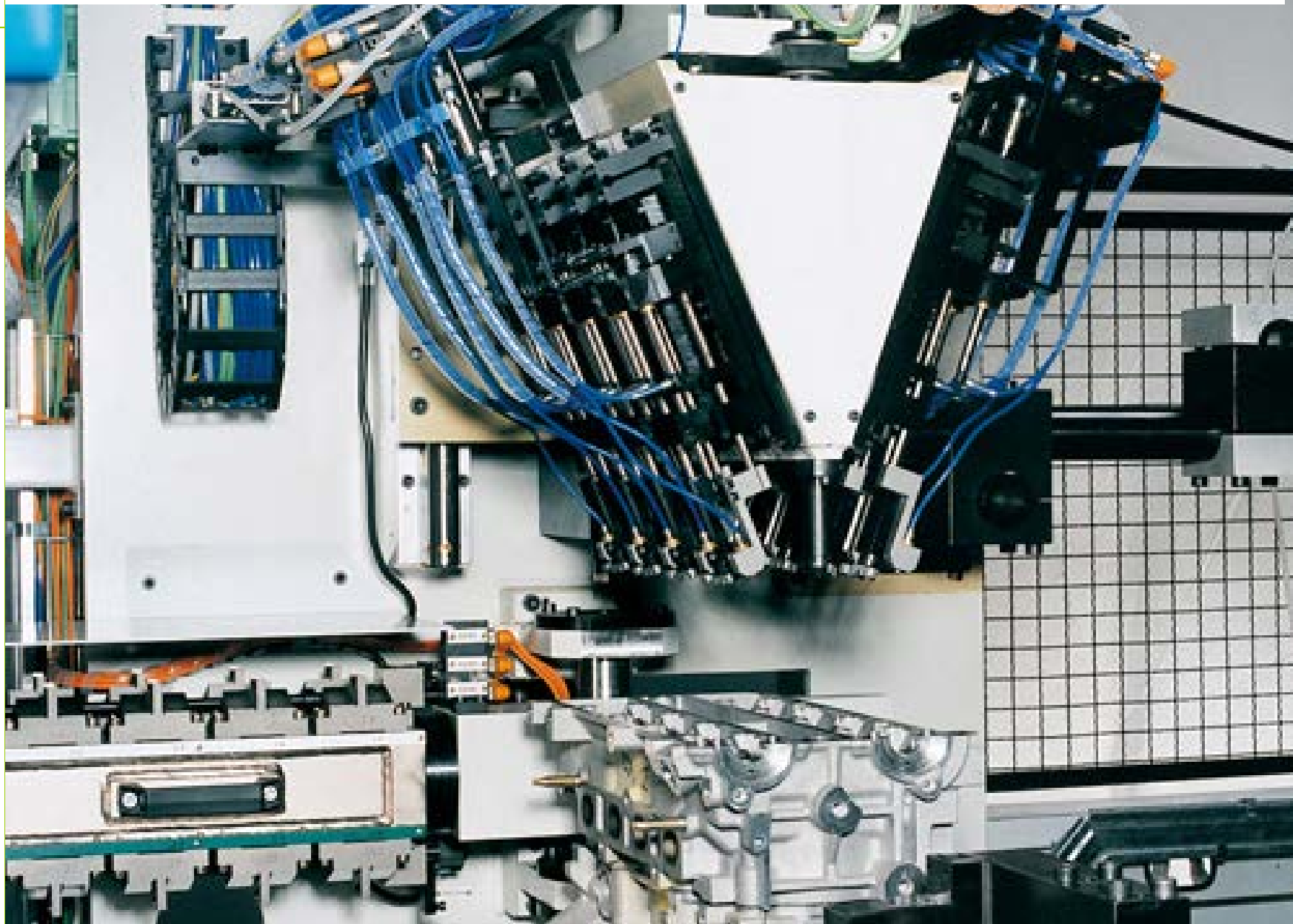
Diferencijalni namotaji sekundara su namotani u suprotnom smeru jedan u odnosu na drugi. Zbog ovoga smer indukovanih struja nije istog smera, one su suprotnog znaka. Superponiranjem indukovanih struja omogućava registrovanje smera kretanja objekta čija se distanca meri. U centralnoj poziciji jezgra generiše se nulti napon. Iz ove pozicije se dalje registruje pomeraj u pozitivnom i negativnom smeru, relativno.

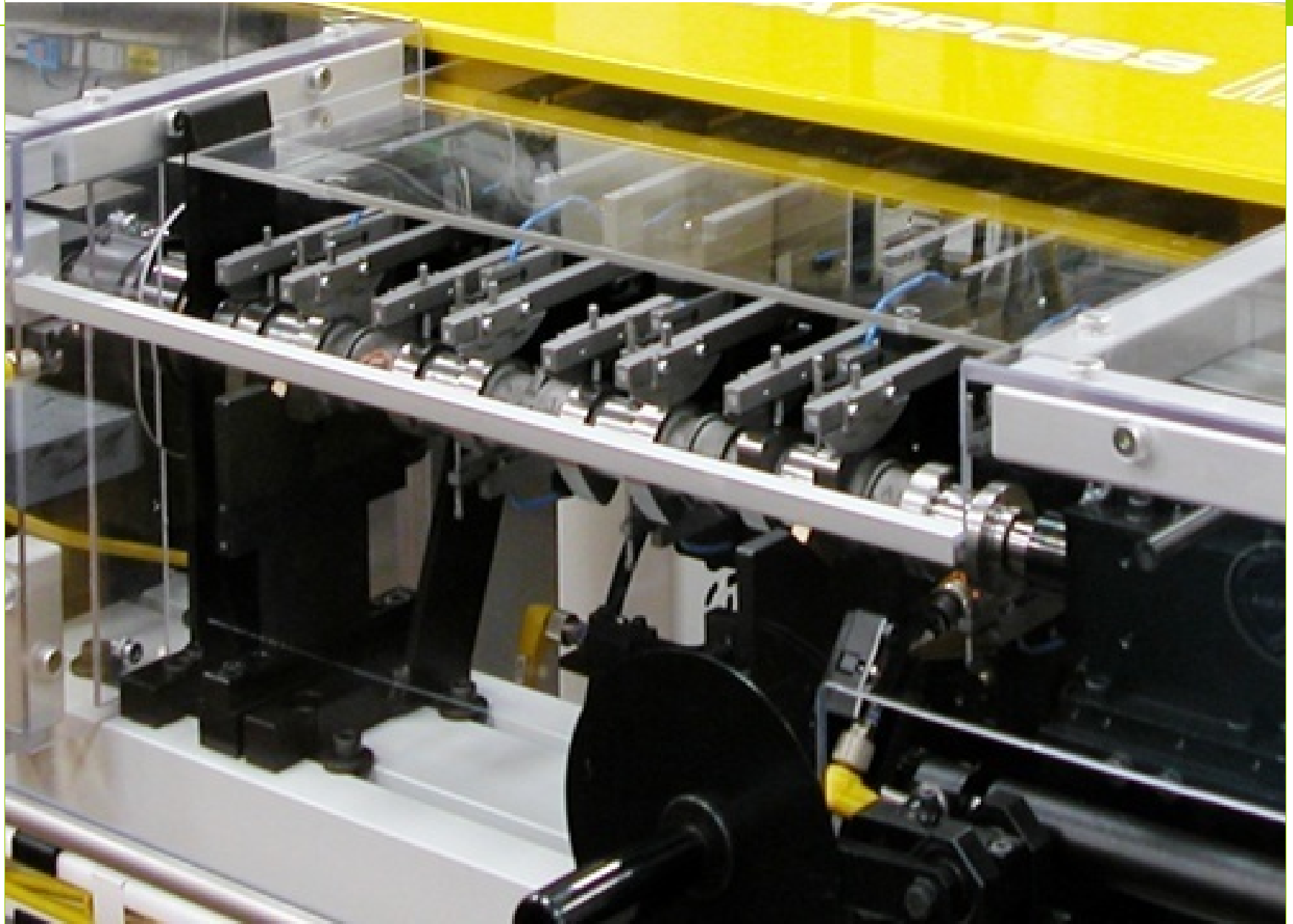
Ovi senzori imaju prednost u odnosu na potencijometar zbog toga što je kretanje kotve slobodno, bez prisustva kontakta sa namotajima. Ipak, generisanje izlaznog signala nije tako jednostavno kao kod potencijometra. U ovom slučaju zahteva se relativno složen sistem za kondicioniranje generisanog signala.



Tipičan slučaj industrijske primene LVDT senzora. Merenje geometrije homokinetičkog zgloba na proizvodnoj liniji i selekcija dobro/loše. LVDT senzori sa pneumatski aktuiranim jezgrom se raspoređuju na određenim pozicijama pomoću odgovarajućeg steznog pribora i u potpuno automatskom ciklusu vrši se skevenca merenja koja traje par sekundi. Posle očitavanja merenih vrednosti, vrši se komparacija sa nominalnim vrednostima i identifikuju nedozvoljena odstupanja.







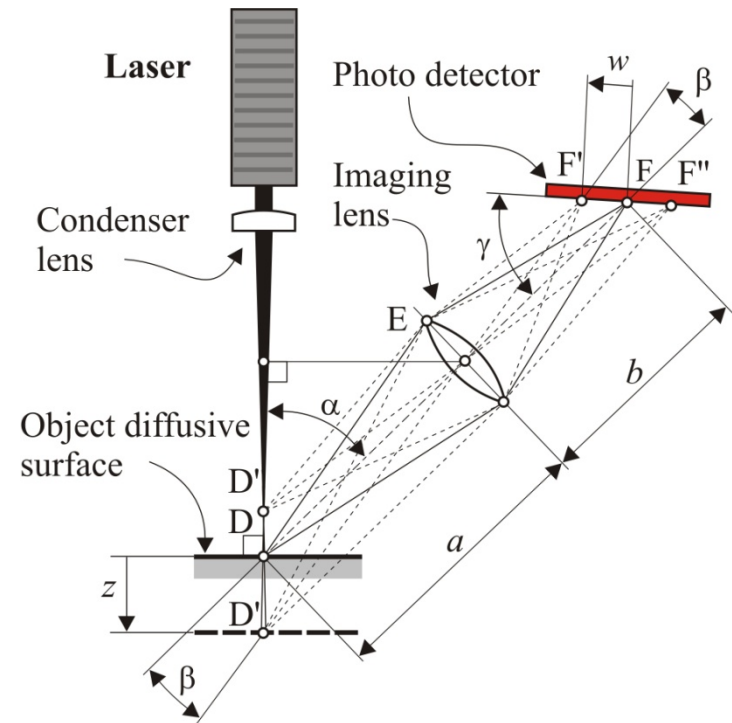
Optički triangulacioni senzor

Pomeraj je moguće meriti i optičkom triangulacijom. Savremeni triangulacioni senzori sastoje se iz izvora svetlosti, po pravilu poluprovodnička laserska dioda, primarnog optičkog sistema, sekundarnog optičkog sistema, fotoelektričnog pretvarača i odgovarajuće elektronike za kondicioniranje rada mernog sistema u celini. Koherentna svetlost koju emituje laser konvergira se ka objektu čija se distanca meri. Svetlosni zrak se difuzno odbija od površi objekta i rasipa u svim pravcima. Jedan deo te svetlosti se prihvata sekundarnom optikom i fokusira na optoeletrični pretvarač. Pretvarač može da bude analognog tipa – PSD (*Photo Sensitive Detector*) i digitalnog tipa – linearni CCD ili CMOS čip.

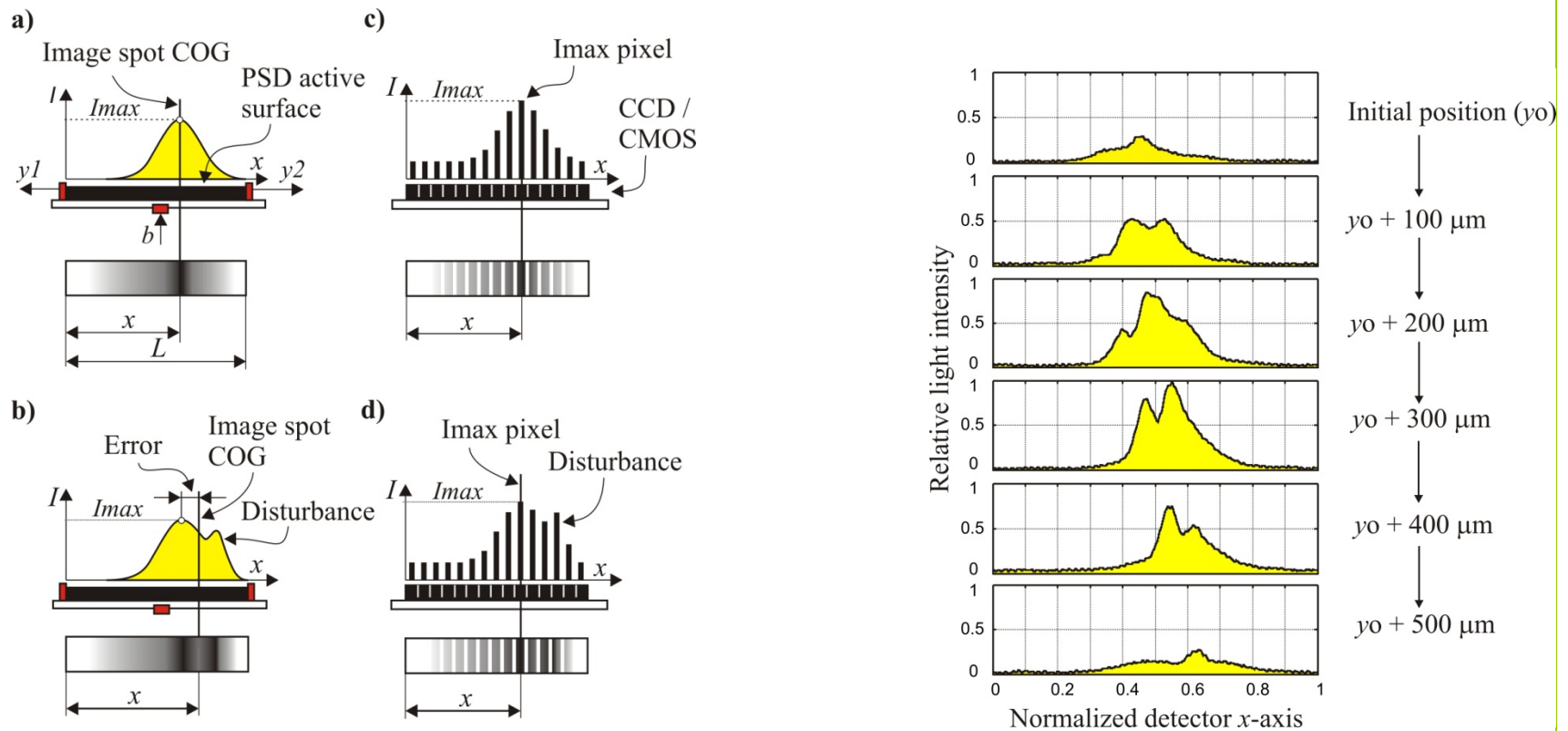
Primenom triangulacije, odnosno čisto geometrijskih relacija, izračunava se distanca do objekta koji se prati.

Ukoliko je meta jako reflektivna, onda se primenjuje drugačiji ugao upada svetlosti u odnosu na metu, odnosno ulazni ugao je jednak izlaznom. Kod ove vrste senzora postoji problem sistemske greške i vrlo se retko primenjuju.

U oba slučaja merenje je beskontaktno, a distanca do objekta može da bude od nekoliko milimetara pa do nekoliko metara.

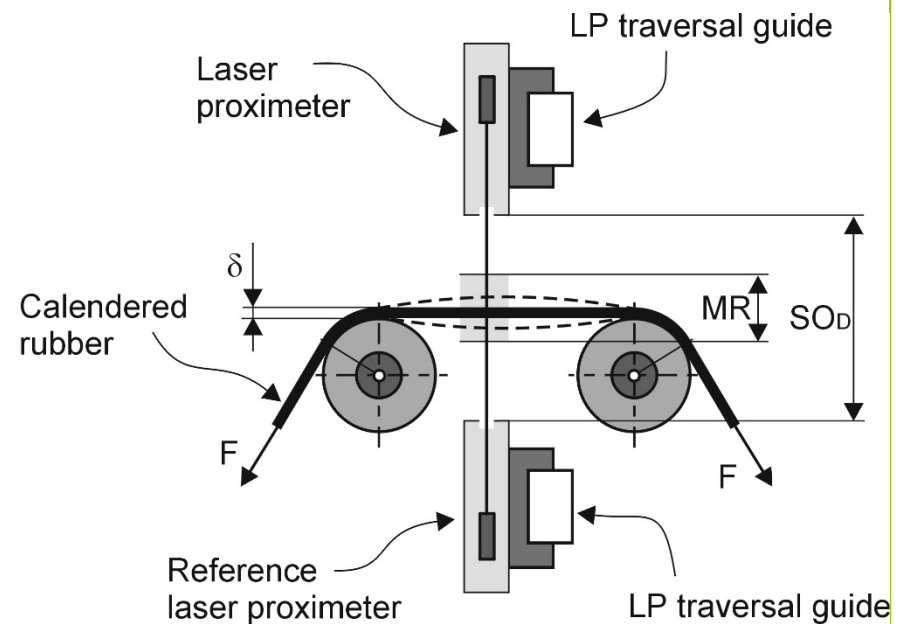
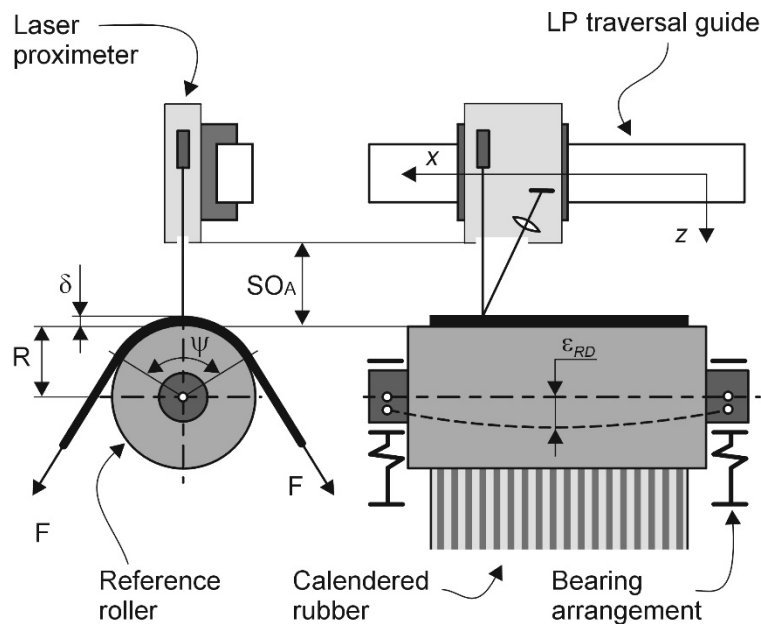


Komparativni prikaz funkcije rada analognog fotodetektora (a) i digitalnog fotodetektora. Rad sa analognim fotodetektorom je mnogo jednostavniji, ali je njegova osetljivost na poremećaje koji dolaze od sekundarnih refleksija mnogo veća. Digitalni fotodetektor čuva informaciju o profilu upadne svetlosti, što omogućava primenu složenih algoritama kojima se potiskuju različiti poremećaji i povećava tačnost i preciznost sistema. Na desnom grafiku je prikazan realni profil snimljen digitalnim CCD fotodetektorom na kome se jasno uočava variranje profila upadne svetlosti u zavisnosti od optičkih svojstava površine mete.

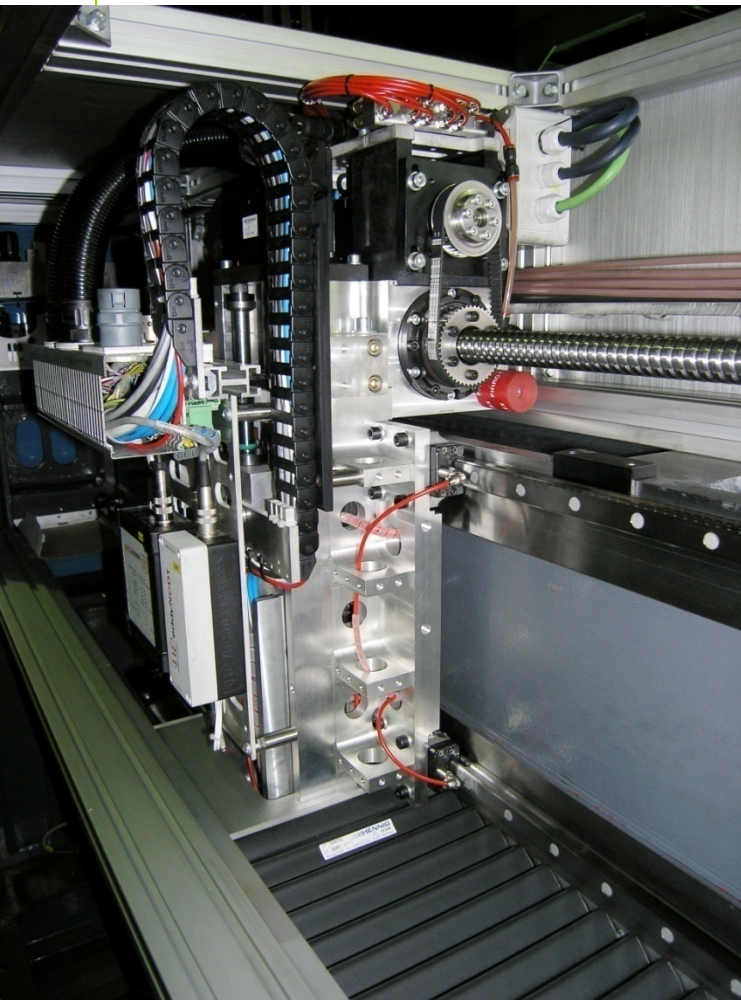
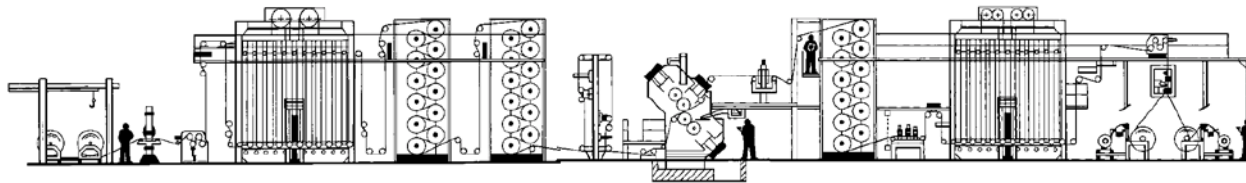


Primer primene triangulacionog senzora na zadatku merenja debljine folije u toku procesa njene proizvodnje.

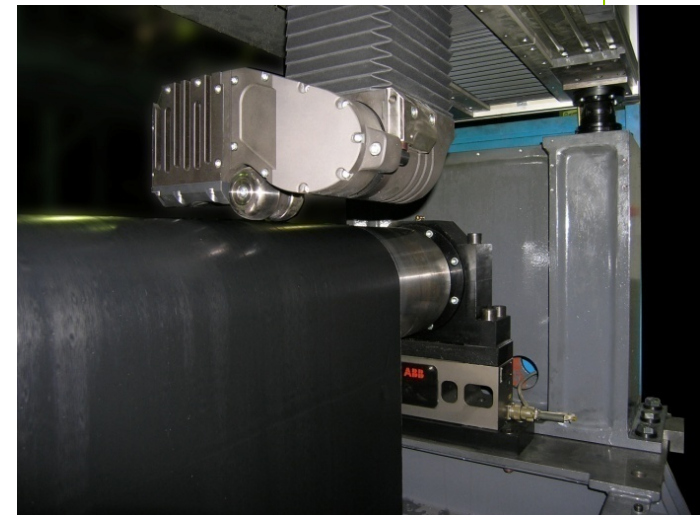
Na levoj strani je prikazan apsolutni sistem merenja koji se izvodi jednim laserskim proksimetrom. Na desnoj strani je prikazan diferencijalni sistem merenja koji se sastoji iz dva triangulaciona senzora. Diferencijalna konfiguracija poseduje inherentno svojstvo potiskivanja grešaka pozicioniranja i vibracija mernog sistema u celini tokom merenja, tako da ova konfiguracija generalno daje značajno veću tačnost.



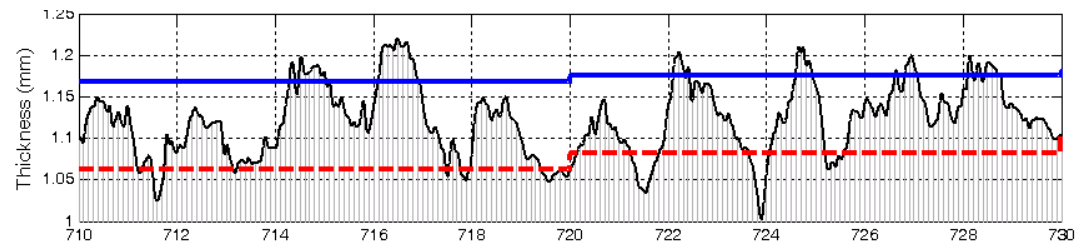
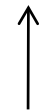
Proizvodna linija za kalangiranje gumiranog korda.



Merna stanica za merenje debljine poprečnog preseka gumiranog korda.



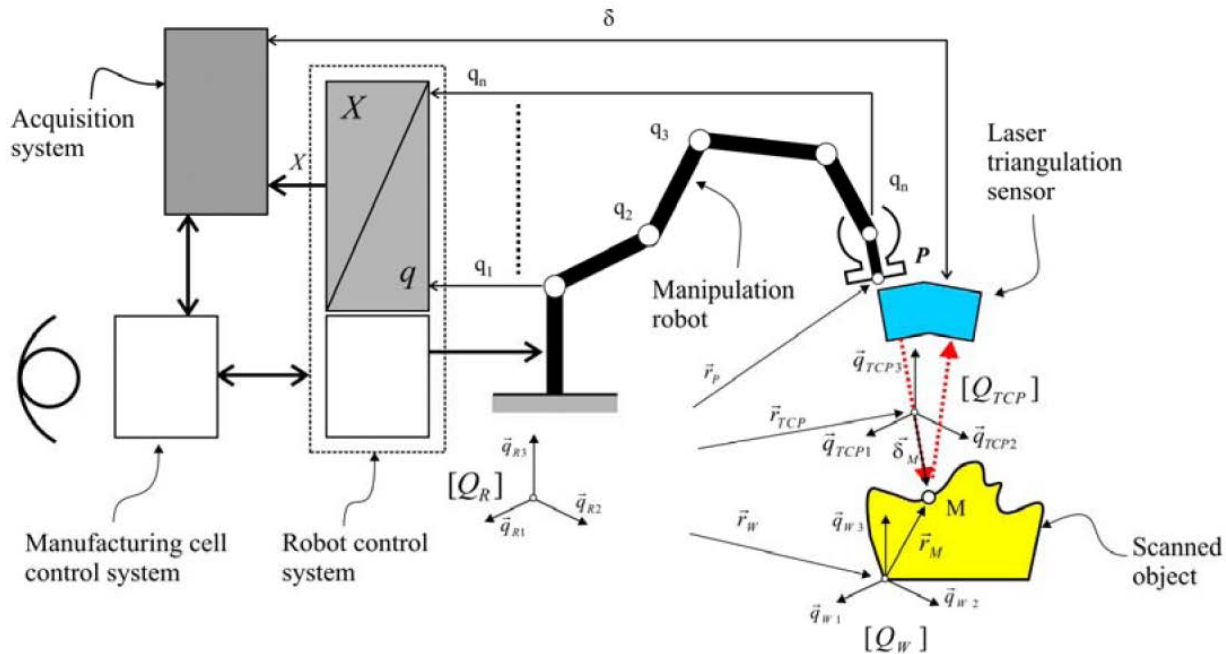
Merni modul koji se sastoji iz laserskog triangulacionog senzora podmikronske rezolucije i indukivnog senzora za referenciranje.



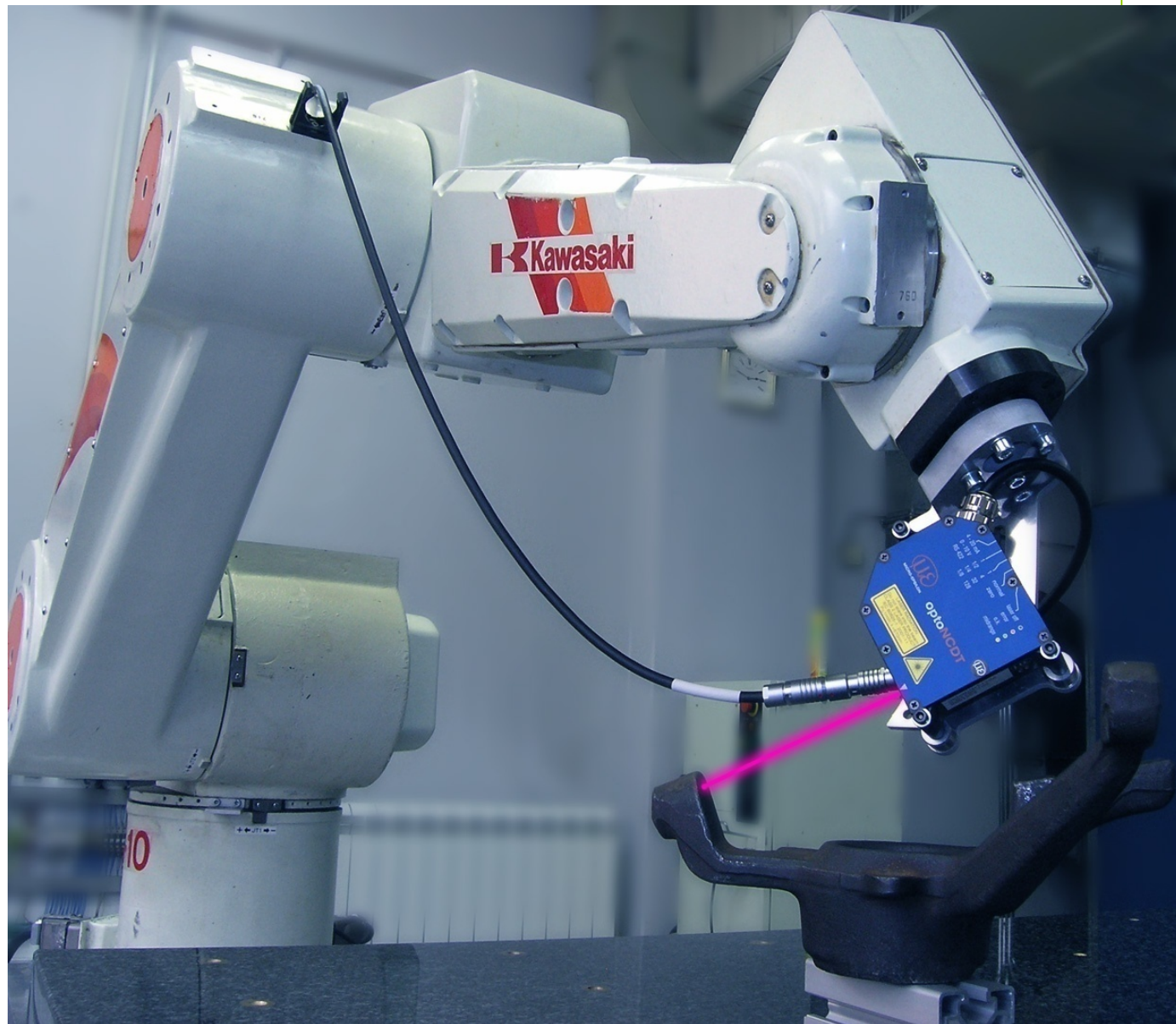
Primer skeniranog profila.

Primer primene triangulacionog senzora u robotizovanom skeniranju delova kompleksne geometrije.

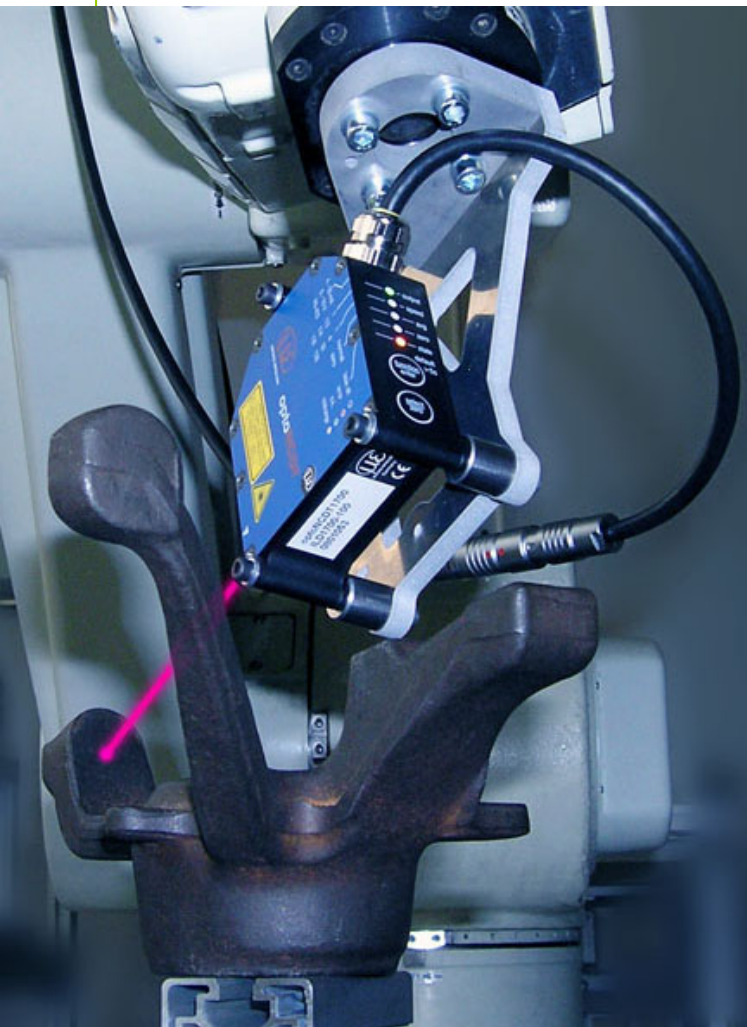
Na vrh robota može se ugraditi triangulacioni senzor. Pokretanjem robota premešta se senzor u prostoru na poznat način (enkoderi u zglobovima robot daju ugaone koordinate odakle se izračunava TCP robota koji se povezuje sa nekom karakterističnom tačkom unutar mernog opsega triangulacionog senzora). Na ovaj način dobijen je merni sistem koji može da skenira površinu nekog nepoznatog predmeta, odnosno da generiše oblak tačaka koji određuju lokaciju i oblik vidljive površine objekta unutar radnog prostor robota. Ova tehnologija se može uspešno primeniti za proces reverznog inženjerstva.



Manipulativna svojstva robota se mogu efikasno za optimalno pozicioniranje laserskog triangulacionog senzora u odnosu na površinu koja se skenira. Osa primarnog optičkog sistema se može u većini slučajeva dovesti u položaj koji je kolineararan sa lokalnim ortom površi na koju se usmerava laserski zrak. Tako se dobijaju tačna merenja.



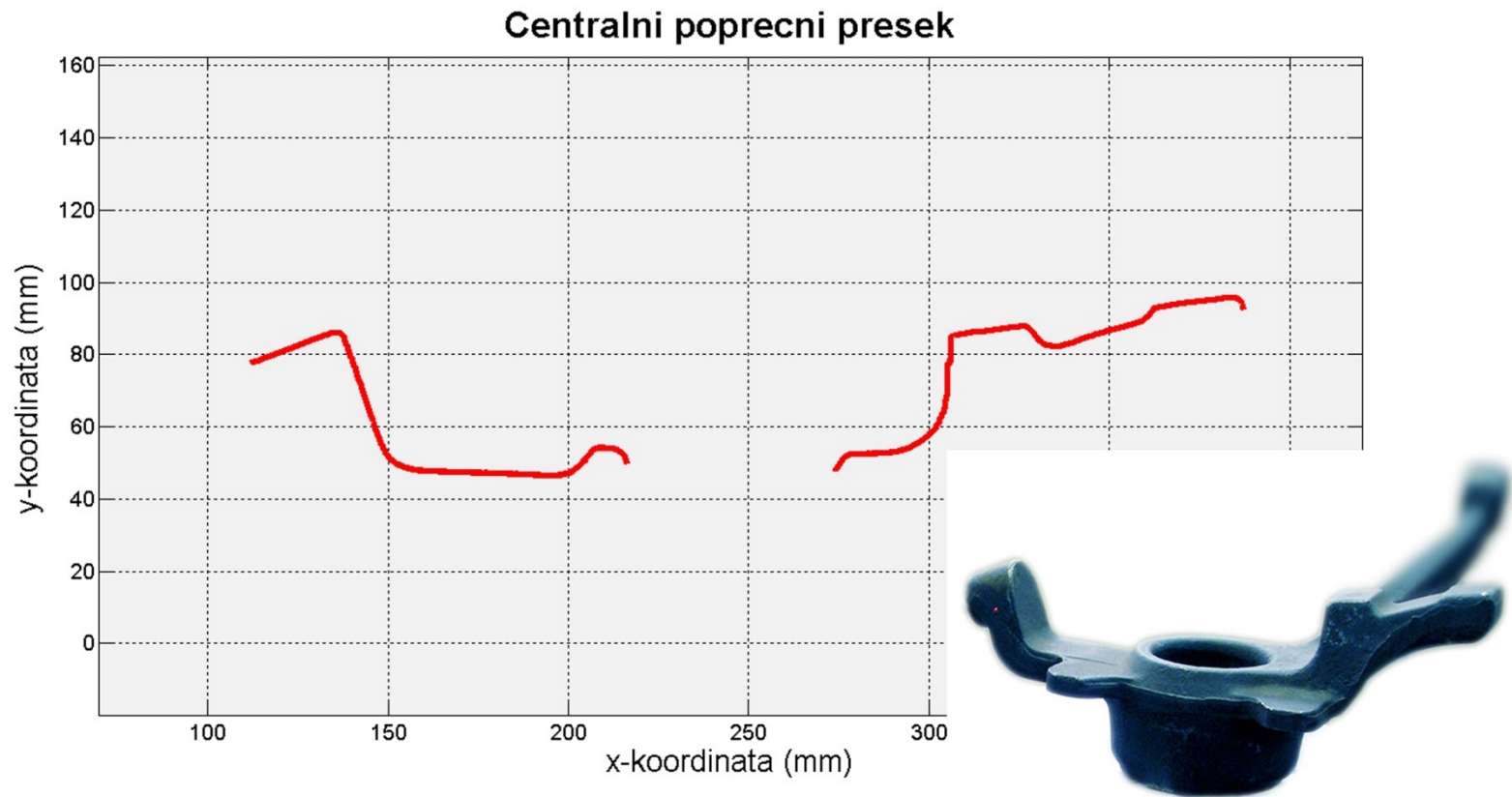
Distance koje meri laserski triangulacioni senzor se uparuju sa vektorom generalisanih koordinata mehanizma manipulacionog robota, odakle se primenom Jakobijanove transformacije izračunavaju koordinate skenirane tačke u spoljašnjem prostoru.



Niz ovakvih tačaka (generiše se nekoliko hiljada tačaka u sekundi) formira skup tačaka koji se naziva nestrukturirani oblak tačaka. Sekundarnom obradom kroz ove tačke se provlače diskretne površi (poligonizacija), najčešće su to trouglovi kojima se opisuje površ skeniranog objekta.

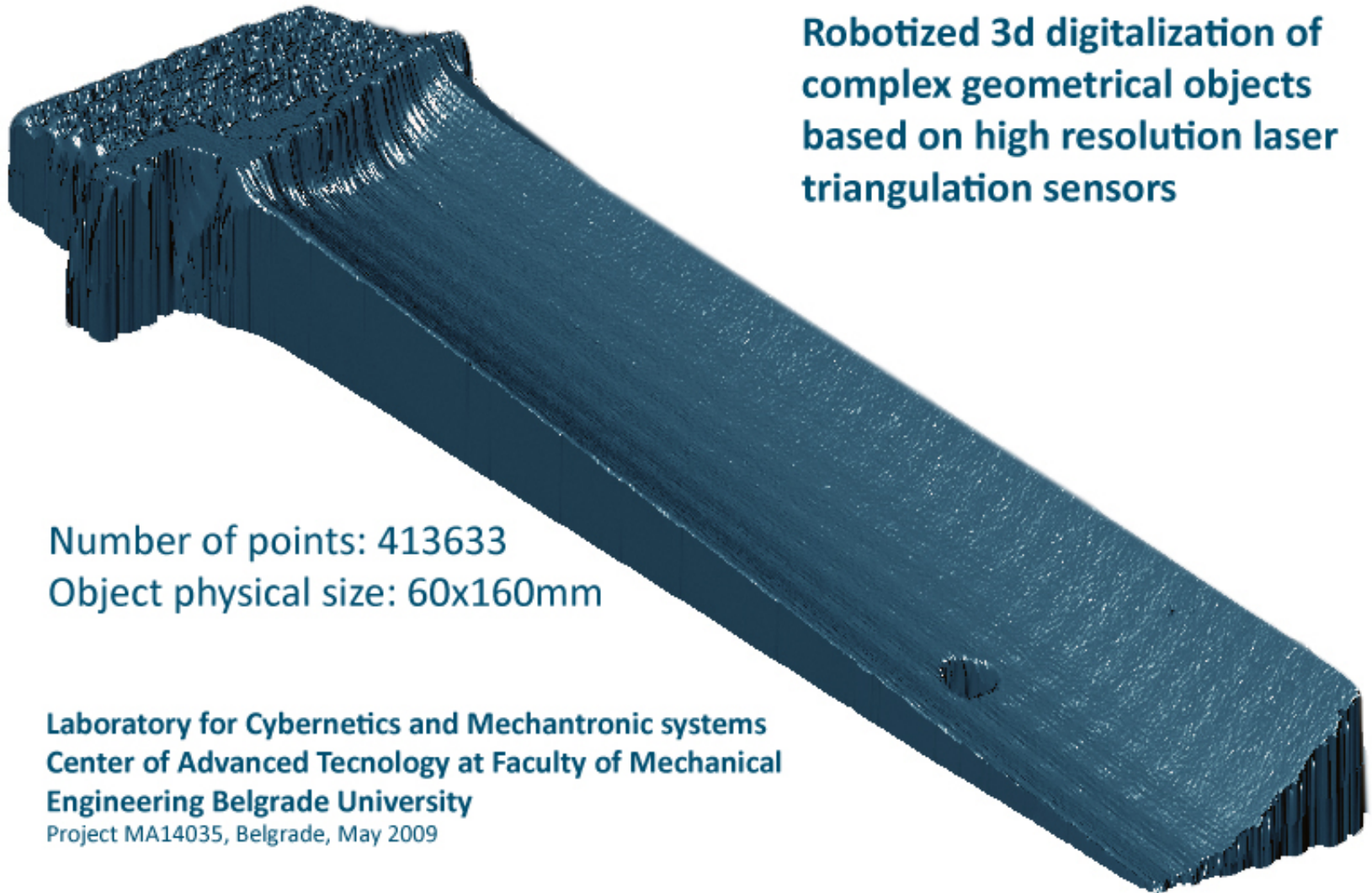


Primer robotskog skeniranja geometrije poprečnog preseka otkovka direktno na proizvodnoj liniji, posle operacije kovanja. Skeniranje se ovde koristi u kontekstu dimenzionarne metrologije za praćenje kvaliteta proizvodnog procesa, u ovom slučaju procesa kovanja, koji je osetljiv na čitav niz poremećaja.



Primer robotskog skeniranja geometrije lopatice turbo generatora

Robotized 3d digitalization of complex geometrical objects based on high resolution laser triangulation sensors

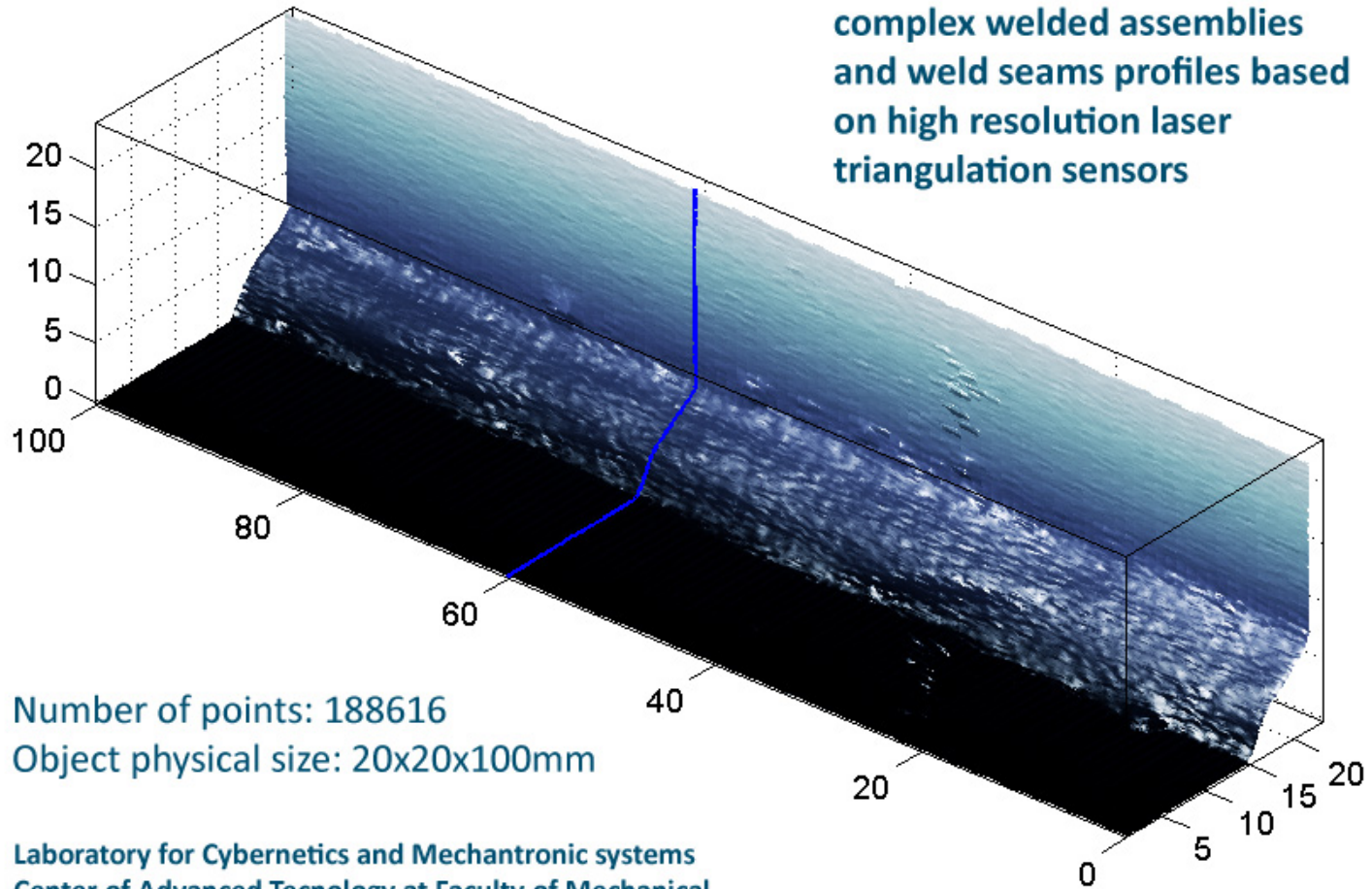


Number of points: 413633
Object physical size: 60x160mm

Laboratory for Cybernetics and Mechatronic systems
Center of Advanced Technology at Faculty of Mechanical
Engineering Belgrade University
Project MA14035, Belgrade, May 2009

Primer robotskog skeniranja geometrije šava dobijenog zavarivanjem MIG postupkom.

Robotized 3d digitalization of complex welded assemblies and weld seams profiles based on high resolution laser triangulation sensors



Number of points: 188616
Object physical size: 20x20x100mm

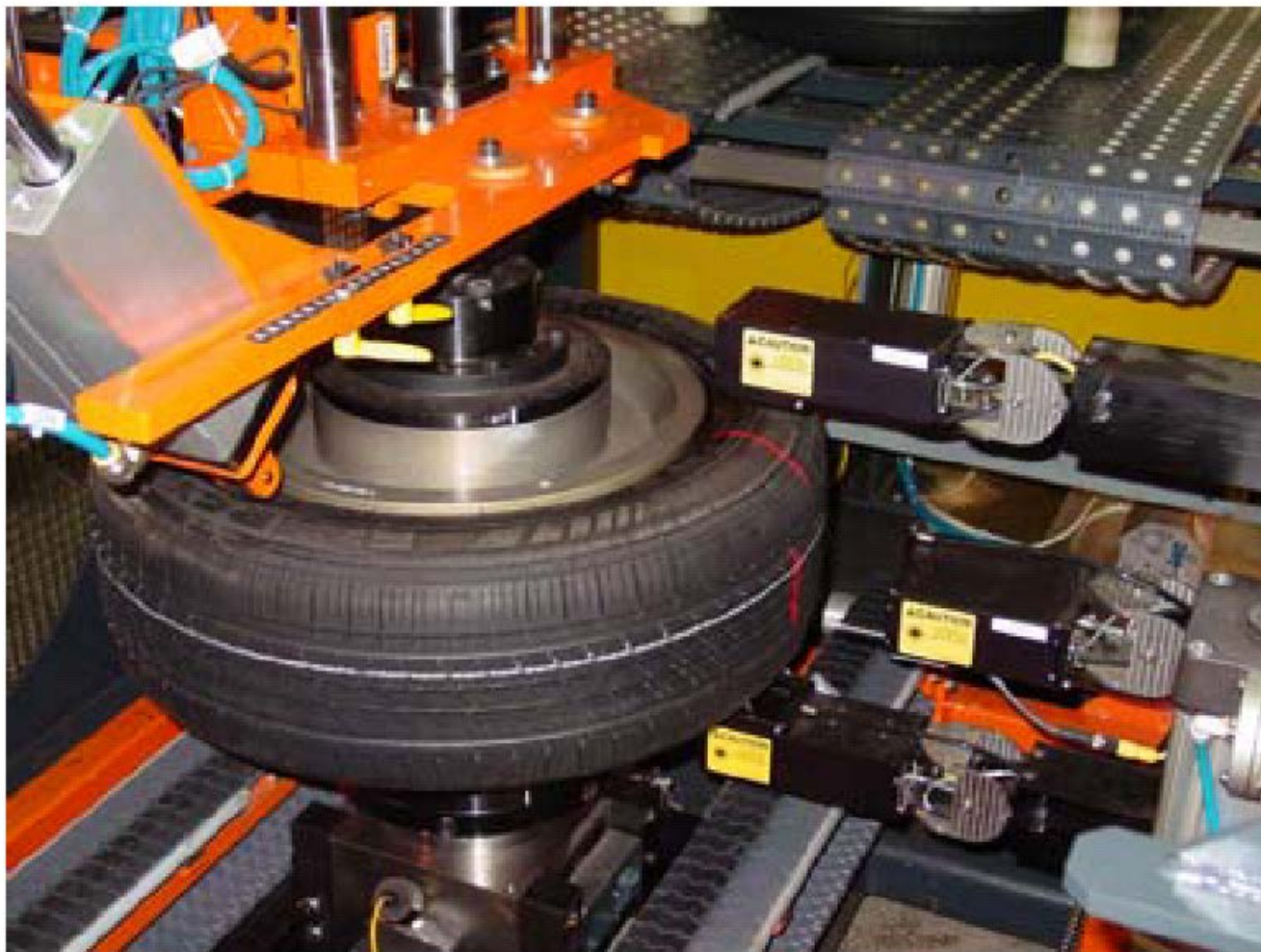
Laboratory for Cybernetics and Mechantronic systems
Center of Advanced Tecnology at Faculty of Mechanical
Engineering Belgrade University
Project MA14035, Belgrade, May 2009

Primer skeniranja geometrije pneumatika, u finalnoj fazi njegove proizvodnje.

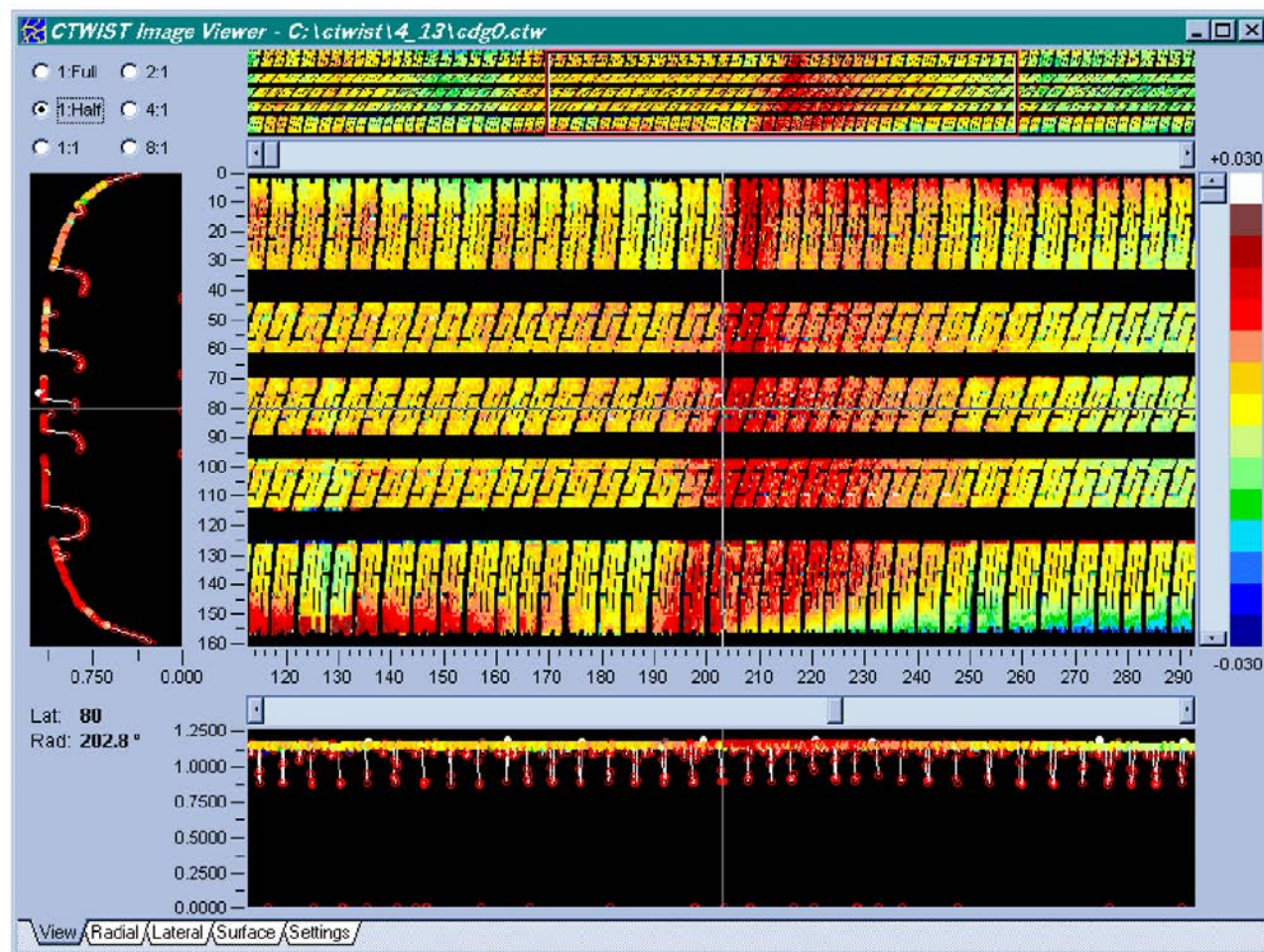


Za ovu vrstu merenja najpogodniji su takozvani laserski profilometri. Za razliku od prethodno opisanih triangulacionih senzora koji zrače tačkasti oblik svetlosti, postoje laserski triangulacioni senzori koji poseduju linijski izvor svetlosti koji se projektuje na objekat čija se geometrija meri. Rezultat je skeniranje profila.

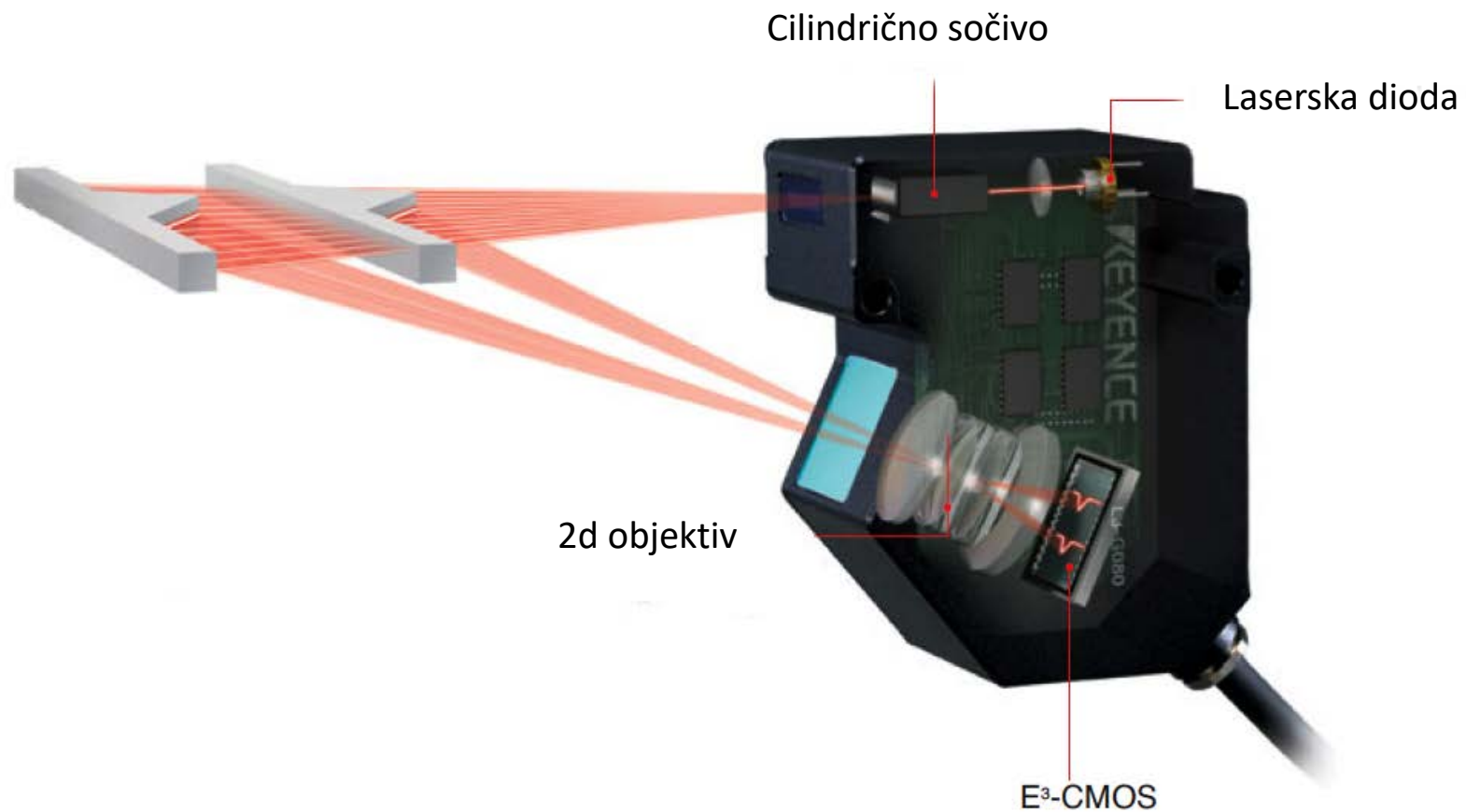
Izgled laserske merne stanice za identifikaciju geometrije gazeće i bočnih površi profila pneumatika. Tri laserska profilometra generišu po 200 profila u sekundi i to jedan za gazeću površinu i dva za levi i desni bok. Ukoliko se pneumatik okreće sa 60 obrtaja u minuti, sistem će posedovati prostornu ugaonu rezoluciju od 1.8 stepeni.



2d prikaz topologije spoljašnje površine pneumatika, takozvani bid-to-bid profil (od naplatka do naplatka) za kompletan obim od 360 deg. Dobijena topologija se prikazuje u odgovarajućoj kolor mapi, kojom se na jednostavan način identifikuju zone odstupanja van tolerancijskih polja, odnosno geometrijska neuniformnost pneumatika.



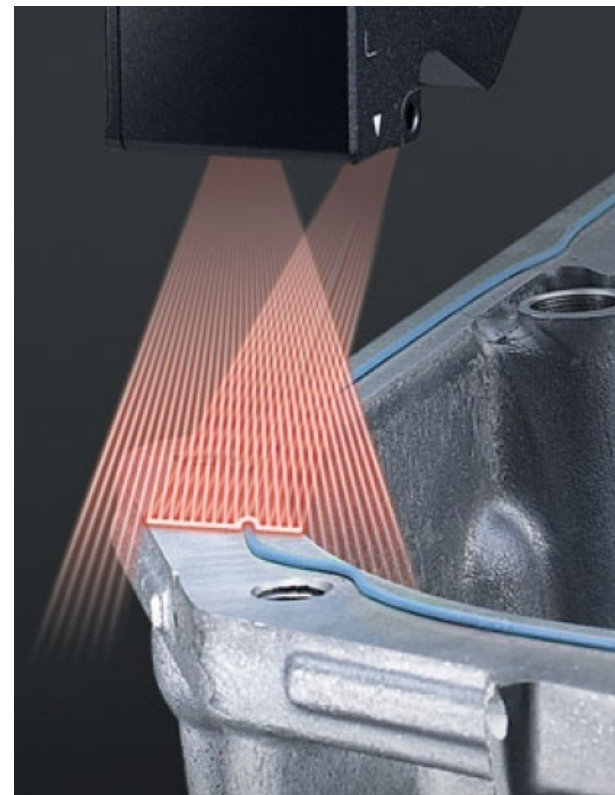
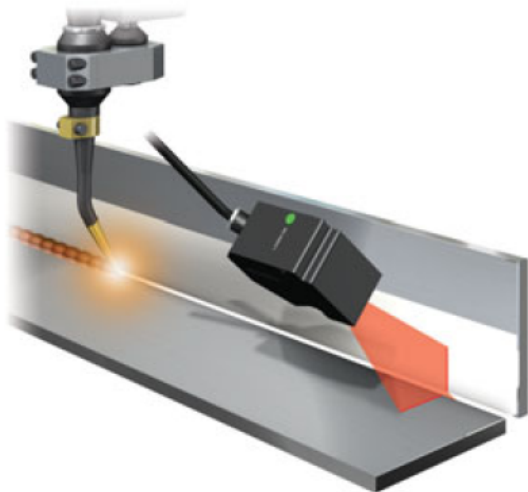
Koncept funkcionisanja laserskog prfilometra – 2d triangulacija





Skeniranje zazora izmedju vrata i šasije automobila





Senzor ubrzanja - akcelerometar

Identifikacija dinamičkog ponašanja nekog objekta se najčešće izvodi merenjem ubrzanja vibracija određenog dela elastične strukture.

Ubrzanje definišemo kao prvi izvod brzine, odnosno drugi izvod pomeraja po vremenu:

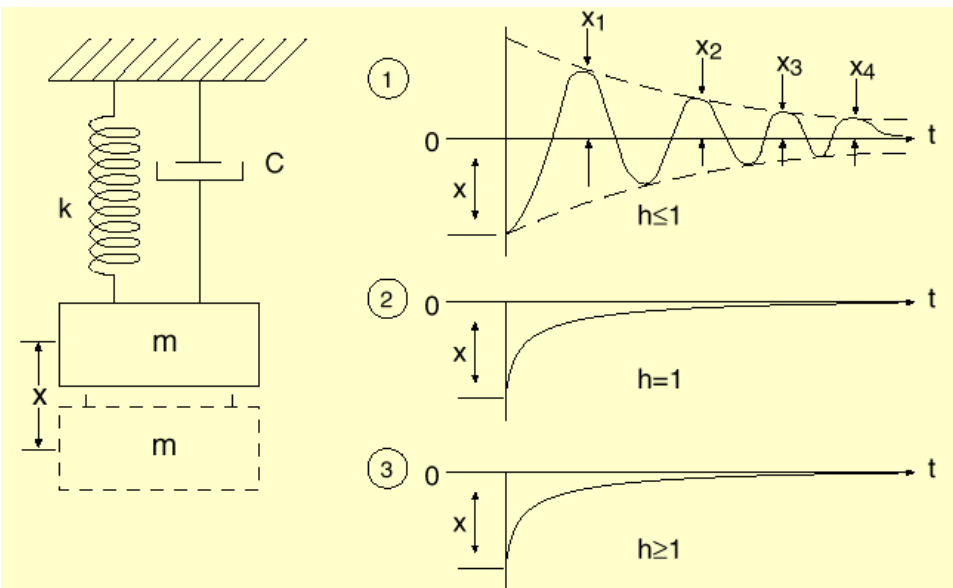
$$a = dv/dt = d^2x/dt^2 = -\omega^2 \sin(\omega t) = \text{ubrzanje}$$

Postoje različite senzorske tehnologije za merenje ubrzanja. Najčešće primenjivana je tehnologija bazirana na piezo kristalu kao pretvaračkom elementu.

Slobodne vibracije

Kada se elastoviskozni sistem izvede iz ravnotežnog stanja, on počinje da osciluje oko svog ravnotežnog stanja. U slučaju jednomasenog oscilatora, ove oscilacije su proste harmonijske oscilacije na sopstvenoj frekvenciji sistema koja je određena njegovim parametrima: masom i krutošću: $\omega_o = \sqrt{k / m}$. Amplituda ovakvih oscilacija postepeno opada zbog prisustva disipativnog elementa u sistemu oslanjanja – linearni elastoviskozni prigušivač sa koeficijentom prigušenja c .

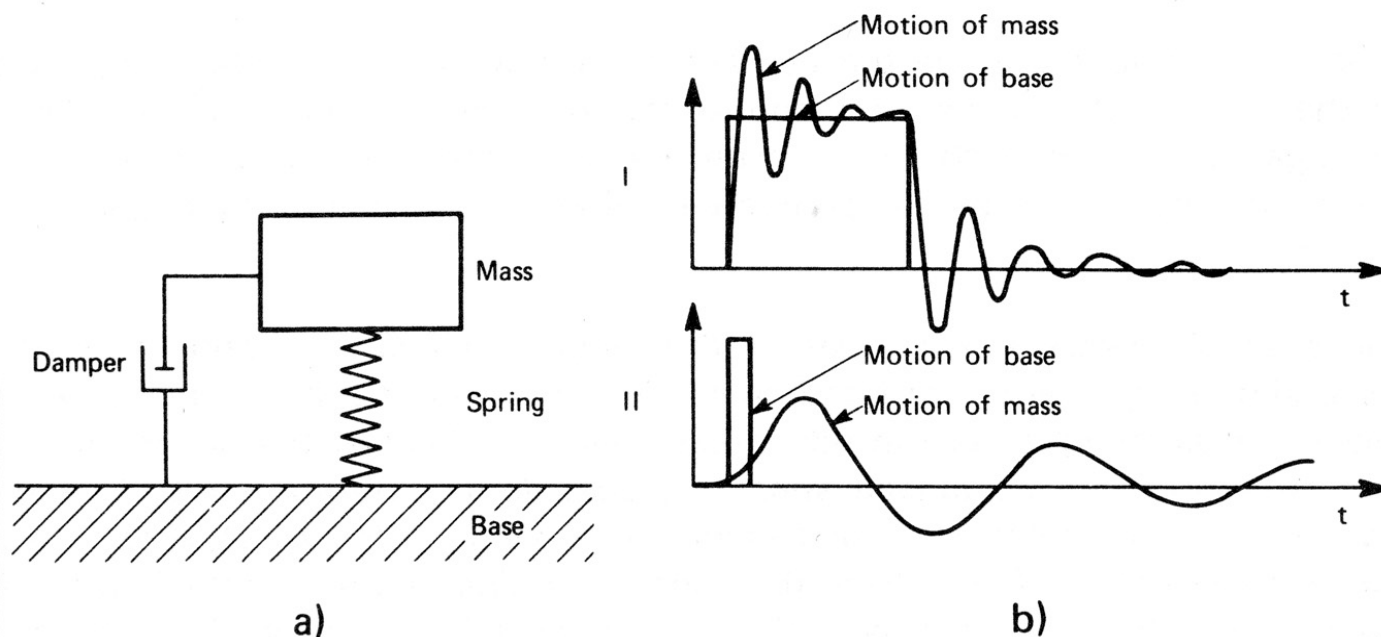
Identifikacija dinamičkog ponašanja nekog mehaničkog sistema se izvodi tako što se taj sistem izvede iz ravnotežnog stanja a zatim se meri ubrzanje vibracija primenom akcelerometra.



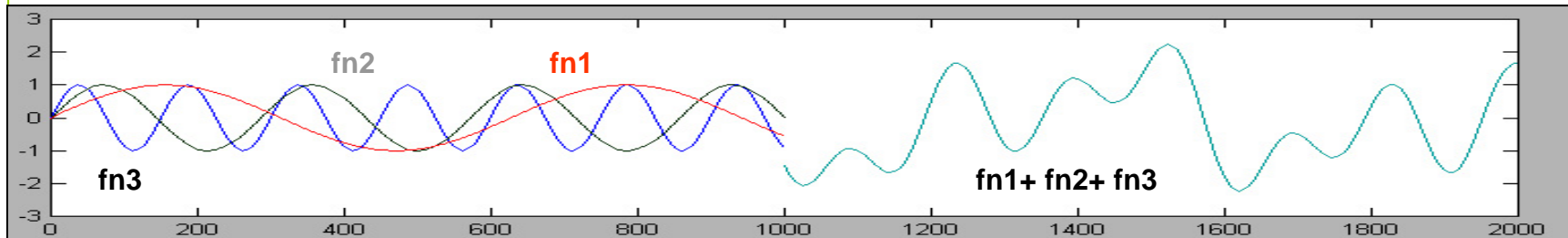
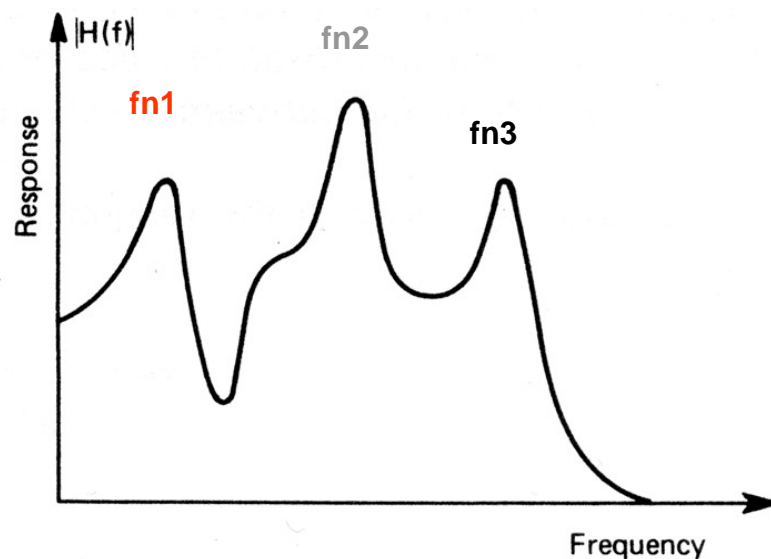
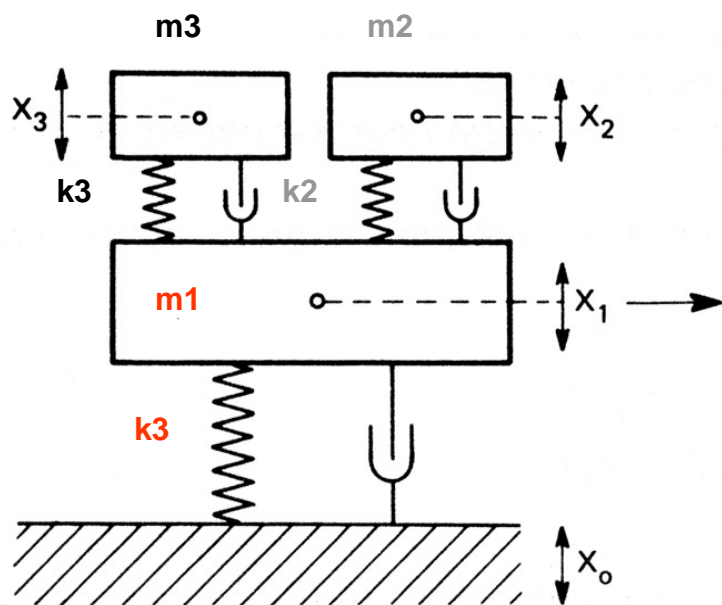
Diferencijalna jednačina koja opisuje oscilatorno kretanje ovakvog sistema glasi:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -c \frac{dx}{dt} - k x$$

Alternativno, identifikacija ubrzanja se može izvesti impulsnom pobudom, primenom specijalnog čekića koji je opremljen senzorom sile za merenje profila pobudnog impulsa. U idealnom slučaju pobudni impuls je pravougaonog oblika. Trajanje impulsa je takodje bitno. U idealnom slučaju trajanje impulsa je beskonačno kratko. Na ovaj način se sistemu saopštava određena kinetička energija na koju on reaguje oscilacijama. Uticaj trajanja impulsa na oscilovanje sistema je prikazan na slici ispod. Ukoliko je trajanje impulsa dugo, onda se taj slučaj može smatrati pobudom sa dve odskočne funkcije. Impuls beskonačno kratkog trajanja se naziva Dirakov impuls. On u teoretskom smislu ima beskonačni intenzitet i jediničnu površinu.

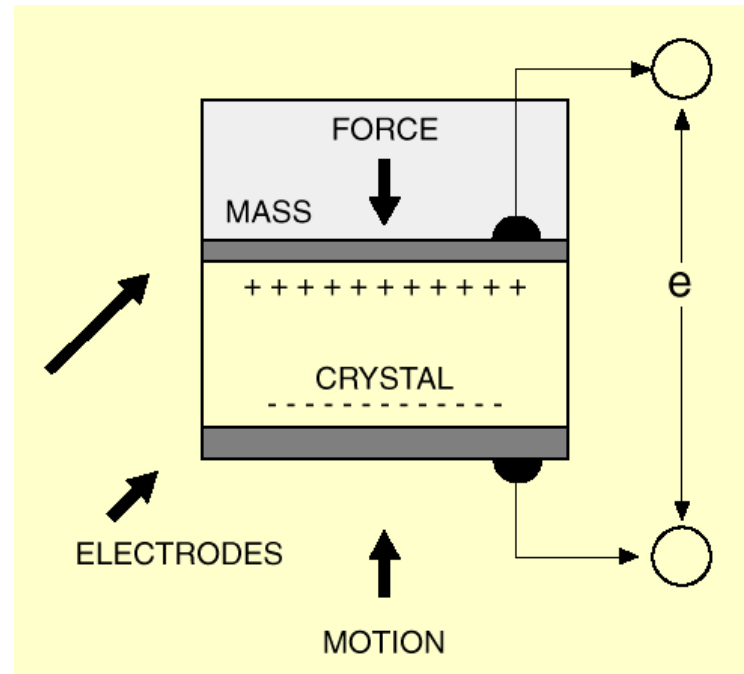


U slučaju sistema sa većim brojem stepeni slobode, dolazi do pojave simultanih prostih harmonijskih oscilacija koje se superponiraju i tako dobija složeno aperiodično oscilatorno kretanje. Sistem sa n stepeni slobode ima n sopstvenih frekvencija na kojima osciluje.



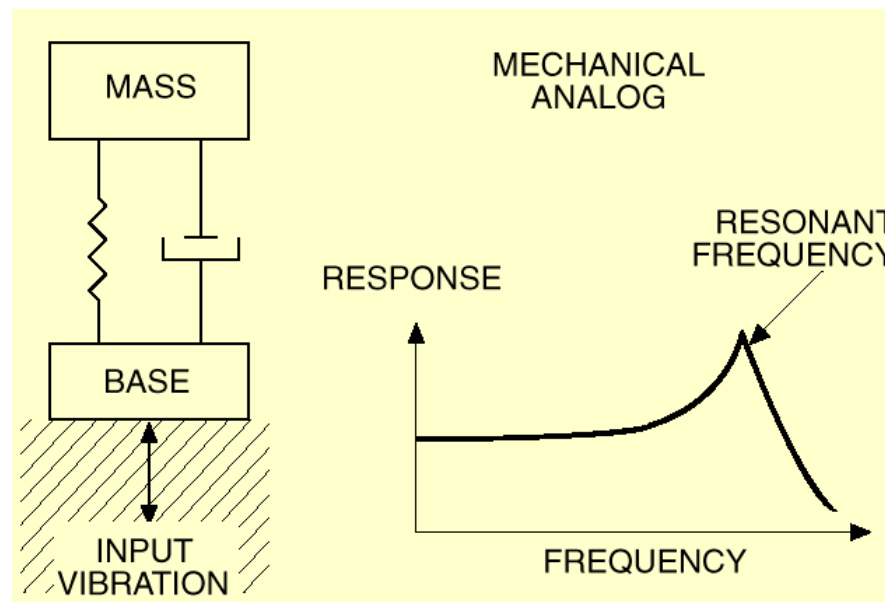
Osnovni gradivni element akcelerometra je piezo kristal.

Piezo kristal pod dejstvom spoljašnje sile generiše nalektrisanje koje je proporcionalno intenzitetu sile. Prema dugom Njutnovom zakonu inercijalna sila je proporcionalna ubrzanju koje deluje na masu. Ukoliko se piezokristal sa jedne njegove strane osloni na objekat čije se oscilacije mere, a sa druge strane poveže odgovarajuća seizmička masa, vibracije ovog sistema će dovesti do pobudjivanja piezo kristala, a pobudna sila će biti proporcionalna ubrzanju vibracija. Ovo je osnova na kojoj funkcioniše akcelerometar.



U skladu sa prethodnim, piezoelektrični akcelerator se može posmatrati kao jednomaseni oscilator, pri čemu masa ovog sistema odgovara seizmičkoj masi koja je priključena jednu stranu piezo kristala, a prigušenje i krutost odgovaraju prigušenju i krutosti piezo kristala. Model i frekventna karakteristika ovakvog sistema je prikazana na slici ispod. Na frekventnoj karakteristici uočava se linearni deo krive i deo koji je nelinearan. Nelinearan deo krive odgovara delu u kome postoji rezonansa. Linearni deo je ove krive definiše oblast primene akceleratora, a gornja granica ovog regiona predstavlja gornju graničnu frekvenciju koja se može prihvatiti kao verodostojna u metrološkom smislu.

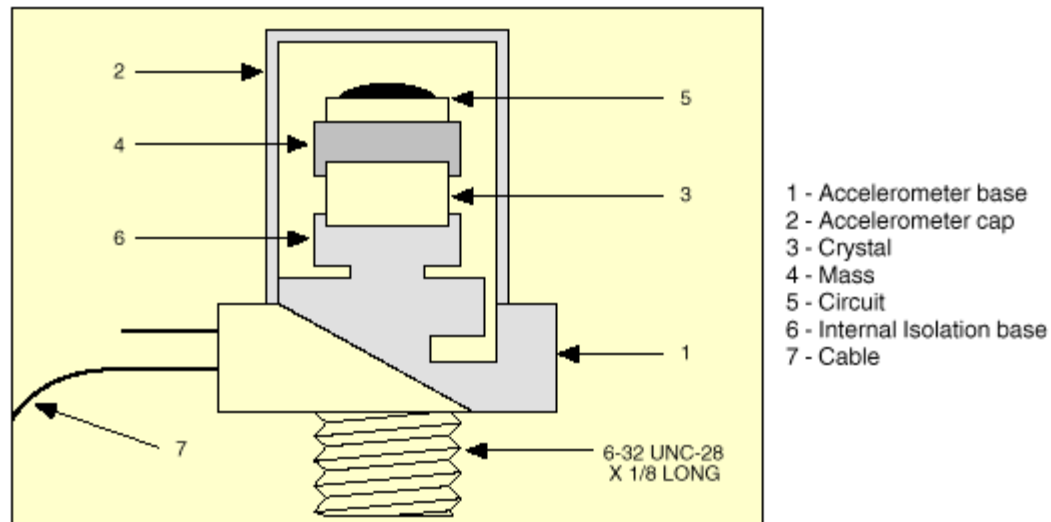
Akcelerator registruje i gravitaciono ubrzanje, ukoliko se njegova glavna osa dovede u položaj kolinearan sa vektorom gravitacionog ubrzanja. Ova činjenica se koristi za kalibraciju akceleratora.



Mehanička konstrukcija

Generalno postoje dve konstruktivne varijante akeleorometra: kompresiona aksijalna konstrukcija i smicajna konstrukcija

Kompresiona aksijalna konstrukcija: pretvarač, odnosno piezo kristal, je čvrsto ugradjen u aksijalnu sendvič konstrukciju koju čine seizmička masa i telo senzora. Ova konsrukcija se odlikuje vrlo velikom mehaničkom robusnošću, visokom sopstvenom fekvencijom i širokim korisnim prostorom, što daje odličan frekvenetni opseg.

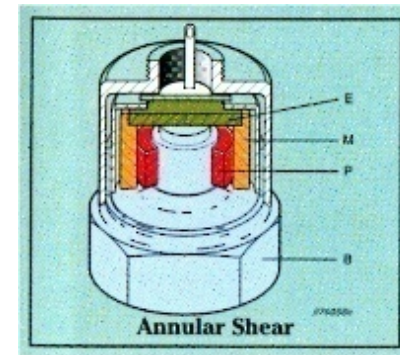
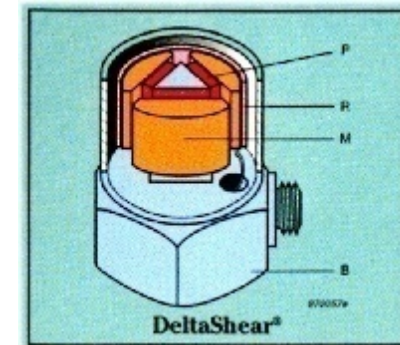
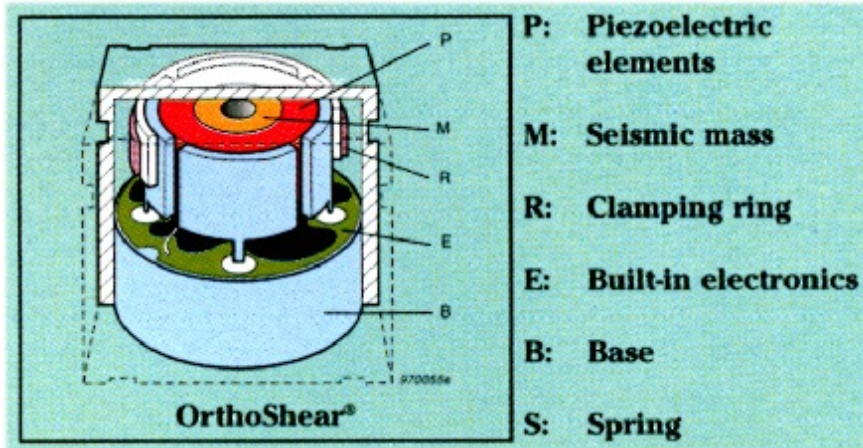


Smicajna konstrukcija:

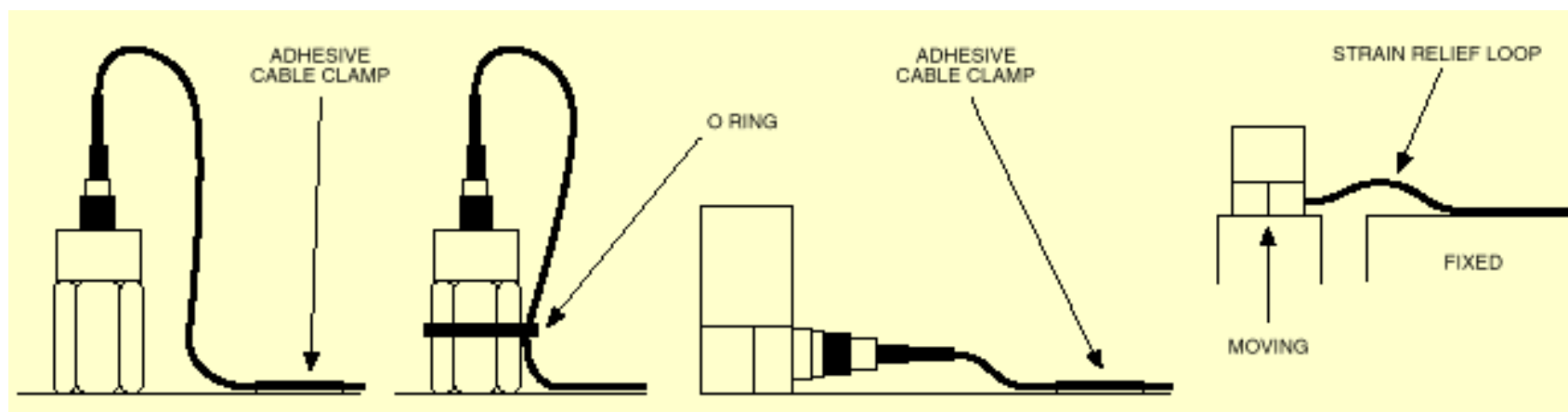
Kompresiona konstrukcija: pretvarač, odnosno piezo kristal, je čvrsto ugradjen u smicajnu sendvič konstrukciju, tako da se kristal izlaže smisajnim opterećenjima u toku rada. Osnovna odlika ove konstrukcije je velika osetljivost na pobudne vibracije, mala osetljivost na deformacije baze senzora i temperaturne efekte. Takodje, ova konstrukcija omogućava elegantnu gradnju višeosnih senzora. Nedostatak je mali prenosni opseg.

Jednoosni model u prstenastoj i delta konfiguraciji

Triaksijalni model

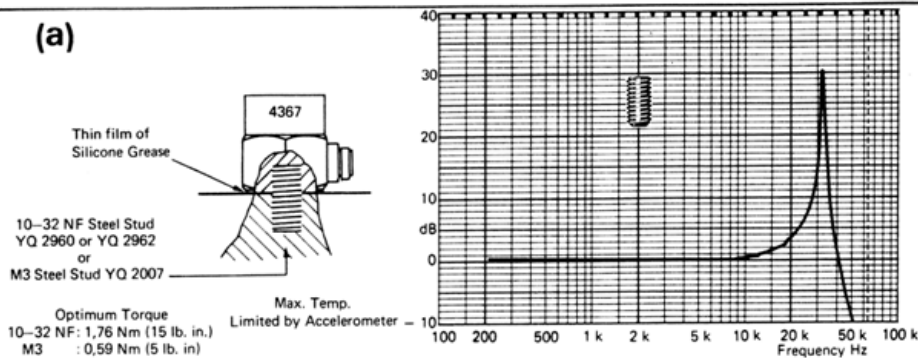


Piezokristal generiše naelektrisanje a ne napon. Zato je problem njegovog kondicioniranja vrlo delikatan. Signal koji generiše kristal se prikuplja i zatim odgovarajućim pojačivačem dovodi na standardne izlazne naponske nivoe, od +/- 5 ili +/- 10V, ili na standardne izlazne strujne nivoe 0 do 20 mA ili 4 do 20mA. Savremeni akcelerometri imaju integrisanu elektroniku za kondicioniranje neposredno u sklopu pretvarča, što rešava mnoge probleme u radu sa vrlo osetljivim izalcom piezokristala. Ipak, kada je masa senzora kritičan faktor, onda se elektronika za kondicioniranje realizuje kao odvojeni modul. U ovom slučaju, karakteristike kabla koji povezuje pretvarač i elektroniku za kondicioniranje su vrlo značajne, kao i polaganje kabla, jer njegove vibracije mogu zbog unutrašnjeg trenja izmedju provodnika da generišu vrlo velike smetnje, reda veličine korisnog signala.

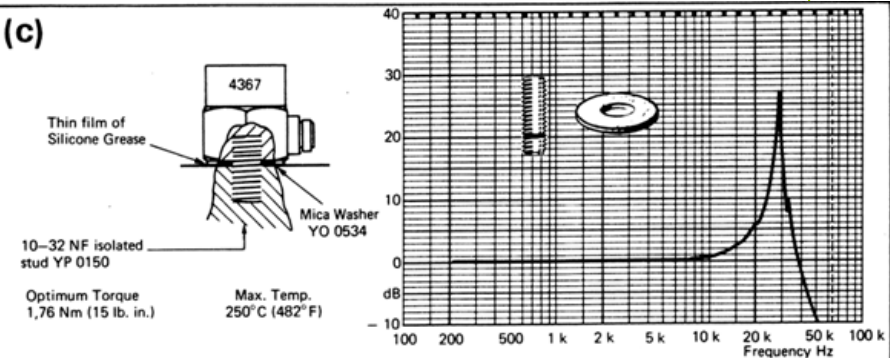


Povezivanje akcelerometra sa objektom čije se vibracije mere je vrlo bitan aspekt. Kontakt mora da bude što čvršći kako bi se obezbedio prenos visokofrekventnih komponenata. Problematična situacija nastaje kada je neophodno električno izolovanje tele akcelerometra. Tada se koriste izolacione podloške ili se vrši lepljenje, što može značajno da degradira prenosni opseg. Dalje se navodi sedam osnovnih slučajeva priključivanja akcelerometra sa odgovarajućim prenosnim karakteristikama. Prenosni opseg akcelerometra se kreće u intervalu od nekoliko kiloherca pa do nekoliko desetina kiloherca, retko prelazeći 50 kHz.

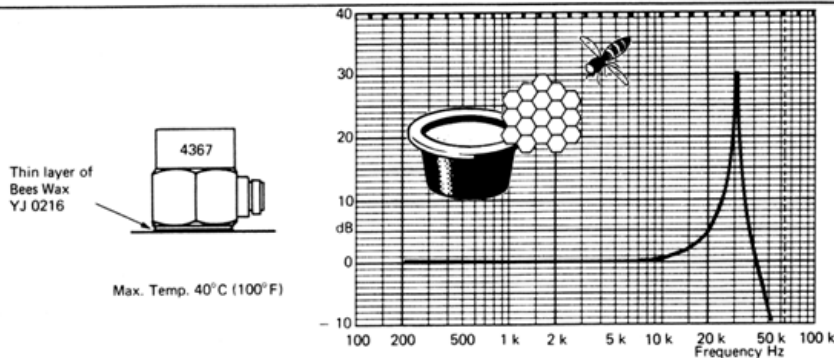
(a)



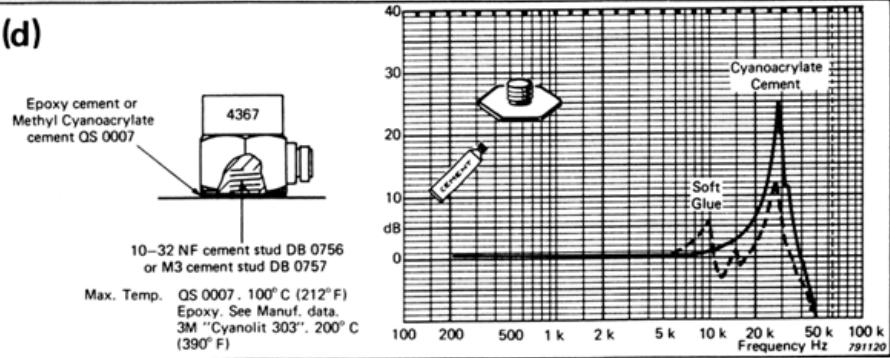
(c)

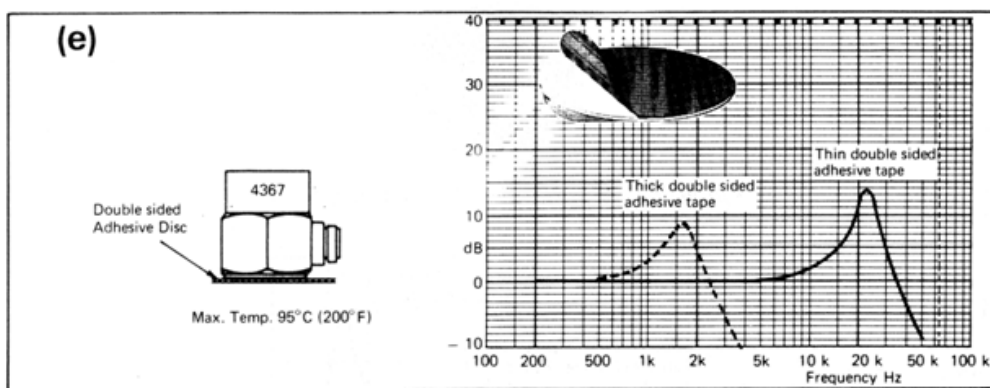


(b)

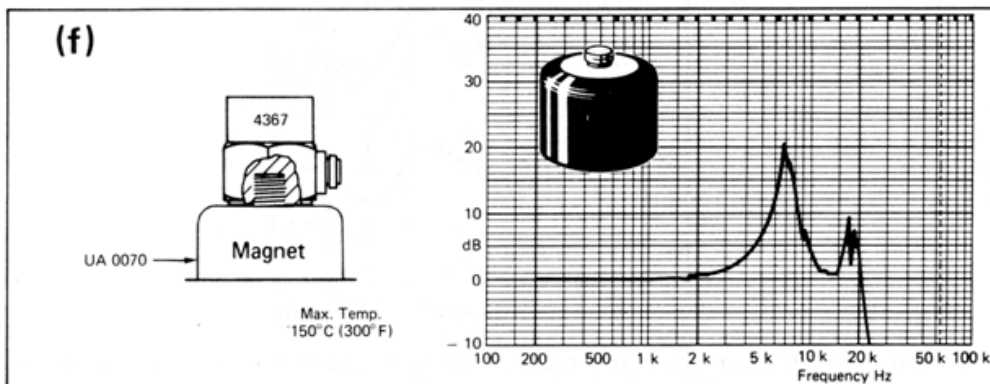


(d)

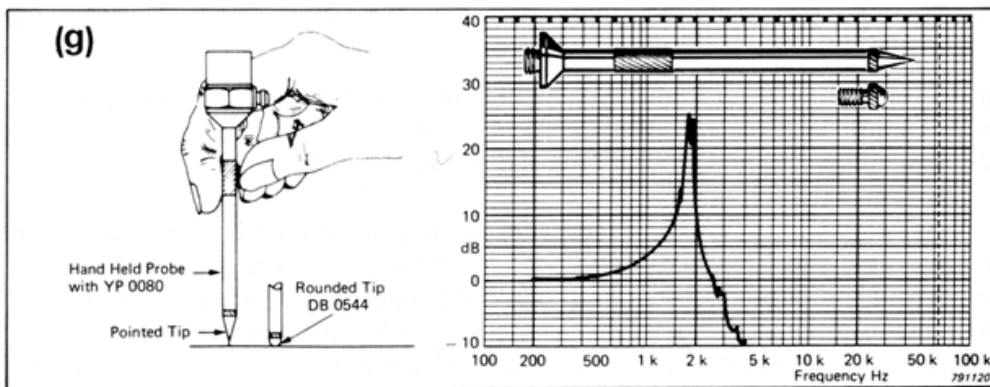




Slučaj priključivanja f i g se odnose na portabilne sisteme za merenje vibracija.



Sa aspekta praktične primene, bitan je uticaj mase akcelometra na masu objekta čije se vibracije mere. Ovaj uticaj nedvosmisleno postoji jer se radi o kontkatnom merenju. Kod izbora akcelometra treba voditi računa da masa akcelometra mora da bude manja od 1/10 mase objekta koji se ispituje.



Drugi aspekt se odnosi na pravac vibracija i glavnu osu akcelometra. Akcelometar ima najveću osetljivost u pravcu glavne ose. Sa odsutpanjem od kolinearnosti opada i osetljivost po kosinusnom zakonu. U transferzalnoj ravni osetljivost bi trebala da ima nultu vrednost, ali to nije tako u praksi. Proizvodjači specificiraju osetljivost transferzalnoj ravni koja po pravilu iznosi od 2 do 5% osetljivosti u glavnoj osi simetrije senzora.

**b4: analogni signali i akvizicija senzorskih
 signala primenom kompjutera,
 osnove digitalne obrade signala**

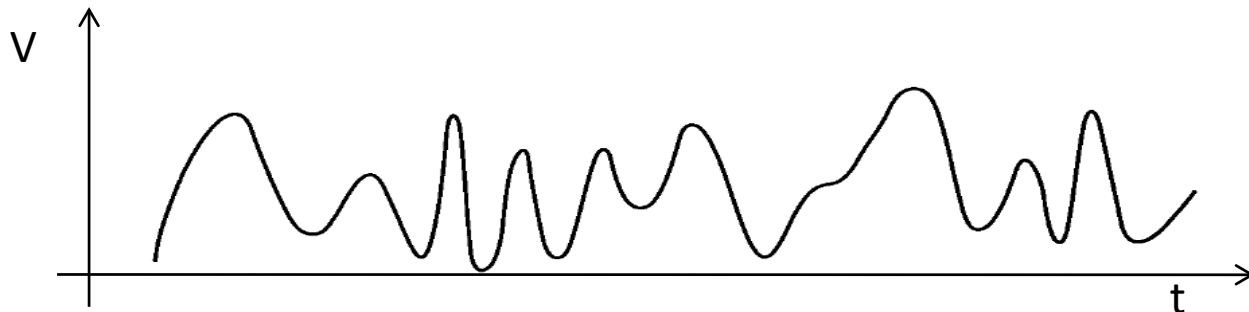
Kao što je već ranije navedeno, senzori po pravilu generišu kontinualan i vremenski promenljiv signal. Ovakav signal nazivamo analognim signalom.

Vremenski analogni signali se mogu klasifikovati na periodične i aperiodične. Takodje, analogni signali se mogu klasifikovati na determinističke i nedeterminističke.

U praksi se javljaju kombinacije aperiodičnih signala sa nedeterminističkim sadržajem. Aperiodični signal nastaje superpozicijom dva ili više periodična signala, ili u slučaju kada je izvor signala nelinearne prirode, kao što je to na primer slučaj sa silom trenja, gde se zbog nelinearnog mehanizma kontaktne interakcije dva objekta, stvaraju aperiodične varijacije kontaktne sile. Drugi primer je sudar dva tela, gde se javlja jedan posebno olik kontinualnog aperiodičnog signala koji nazivamo impuls.

Nedeterministički signali su signali koje generiše neki slučajni proces, a najčešće je to šum. Šum je uvek pristutan u većoj ili manjoj meri i signal šuma se superponira sa aperiodičnim signalom koji generiše senzor.

Tipičan oblik analognog aperiodičnog signala



Alternativni oblik analognim signalima su diskretni signali. Kod diskretnih signala veličine sa kojima se operišu mogu da uzmu samo one vrednosti koje su celobrojni umnožak nekog kvanta. Temperatura kao fizička veličina može da uzme bilo koju vrednost u opsegu koji se posmatra. Nasuprot tome, fizička veličina kojom se iskazuje broj atoma u nekom ograničenom prostoru, može da ima samo diskretne vrednosti, koje odgovaraju broju atoma. Ovde se radi o prirodno diskretnom signalu, za razliku od slučaja kada se jedan prirodno analogni signal diskretizuje.

Generalno, postoje dve vrste diskretnih signala, u zavisnosti od toga koja se koordinata signala diskretizuje. Ukoliko je signal diskretan po intenzitetu fizičke veličine onda govorimo o relejnim sistemima. Ukoliko je sistem diskretizovan po vremenu onda govorimo o impulsnim sistemima. U slučaju kada su obe koordinate diskretizovane, onda se radi o digitalnim sistemima.

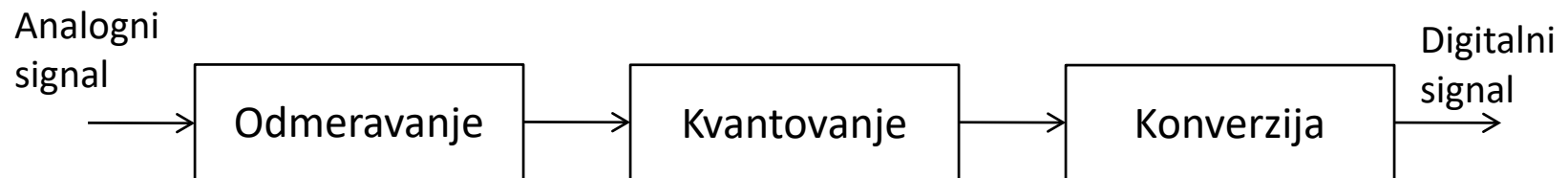
Mehatronske sisteme operišu sa analognim i sa diskretnim signalima. Prisustvo mikroprocesora i njihov ogroman potencijal u obradi signala, nameće potrebu da se svi oblici signala svedu na digitalni signal, bez obzira na njihovu stvarnu prirodu. Proces digitalizacije signala naziva se analogno-digitalna konverzija.

Prevodjenje analognog signala u digitalni oblik

Kao što je prethodno već navedeno ovde se radi o procesu analogno-digitalne konverzije u okviru koga se vrši kvantizacija obe koordinate signala, odnosno kvantizacija njegove vremenske koordinate i koordinate intenziteta signala. U tehničkoj literaturi se za ovaj proces koristi skraćenica ADC ili A/D konverzija. Inverzni proces je prevodjenje digitalnog oblika u analogni i taj proces se naziva digitalno-analoga konverzija ili DAC, odnosno DC konverzija.

Proces analogno digitalne konverzije je složen proces koji se sastoji iz sledećih sekvenci:

1. Odmeravanje,
2. Kvantovanje
3. Kodiranje.



Analogni signal se uvodi u blok za odmeravanje u kome se vrši vremenska diskretizacija i uzorkovanje analognog signala. Vremenska diskretizacija vrši se elektronskim kolom zadržke, koje poseduje osobinu da u odredjenom trenutku zadrži, odnosno memoriše tekuću vrednost analognog signala i čuvaje odredjeno vreme. Trenutak odmeravanja definisan je pojavom impulsa taktnog generatora koji osciluje u odredjenoj, unapred zadatoj frekvenciji. Ovako uzorkovena vrednosti analognog signala, odnosno odmerci, mogu da imaju bilo koju vrednost intenziteta, odnosno odmerci su analogne veličine po intenzitetu. Parametar vremenske diskretizacije je broj odmeraka, odnosno uzoraka u sekundi.

Odmerci se zatim dovode u blok u kome se vrši kvantizacija, odnosno diskretizacija signala po intenzitetu. Odmerak se odgovarajućim kolom za kvantizaciju prevodi u najbližu diskretnu veličinu, odnosno u najbližu vrednost koja ima celobrojni broj umnožaka kvanta. Parametar amplitudne diskretizacije izražava se u relativnom obliku, preko broja bitova kojim se može kodirati neki odredjeni kvant. Tako na primer, industrijski standard je kvantizacija sa rezolucijom od dvanaest bita, što znači da se amplituda odmerka izražava preko kvanta koji ima fizičku vrednost od $V_{\max} / 2^{12}$, odnosno $V_{\max} / 4096$, pri čemu je sa V_{\max} označen interval u kome se kreće vrednost analognog signala (V_{\min} , V_{\max}). Ukoliko analogni signal generiše neki kondicioner koji na svom izlazu ima standarni naponski izlaz od ± 10 V, onda to znači da će naponski kvant imati vrednost od 0.0048828125 V, odnosno 0.05 % izraženo u relativnom obliku.

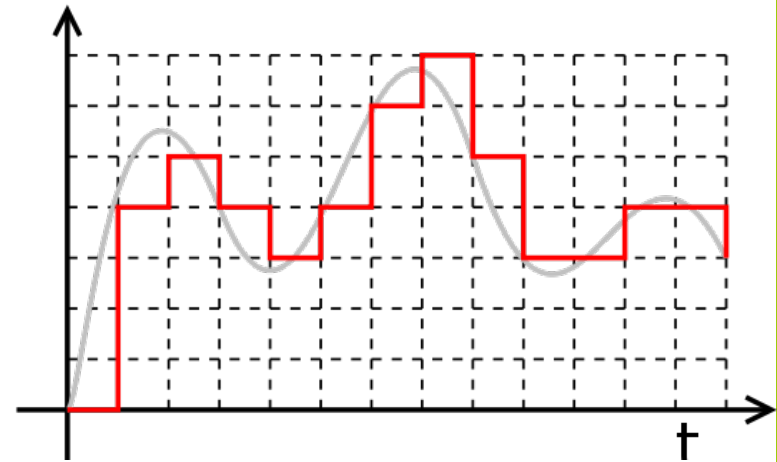
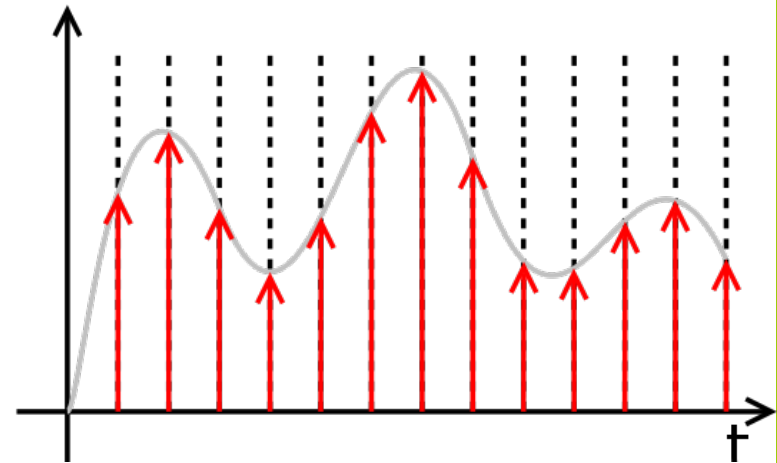
Kvantovan signal se dalje vodi u blok za kodiranje, gde se broj naponskih kvantova kojim je iskazana vrednost odmerka kodira binarnim kodom. U prethodno navedenom slučaju AD konvertora 12 bitne rezolucije, odmerak od +5.25 V, biti kodiran sa 10000110011_bin odnosno, 1075_dec . Na ovaj način se analogni signal prevodi u povorku binarno kodovanih signala.

Proces AD konverzije se jednostavno može prikazati grafički. Proces odabiranja pokazuje kako se vrši diskretizacija po vremenskoj osi i iz analognog signala uzimaju intenziteti u precizno određenim vremenskim trenucima.

Zatim sledi kvantizacija po amplitudi, gde se odmerak iskazuje najbližim celobrojnim brojem amplitudnih kvanta.

Treba uočiti da se ovakav signal ne menja unutar jednog vremenskog kvanta, on ostaje konstantan, odnosno sistem digitalizacije radi kao sistem nultog reda.

Greške AD konverzije: Očigledno je da se u ovakvom procesu pojavljuju greške. Mogu se uočiti dve greške. Prvo, to je greška vremenske kvantizacije, kojom se gube sve vrednosti analognog signala u intervalu između dva uzastopna kvanta. Druga greška je greška amplitudnog kvantovanja, uzorkovani signal se aproksimira prvom najbližom diskretnom vrednošću.



Pored navedenih grešaka, postoji i čitav niz drugih grešaka koje se generišu u ovom kompleksnom procesu, a koje su uglavnom povezane sa gubitkom informacionog sadržaja.

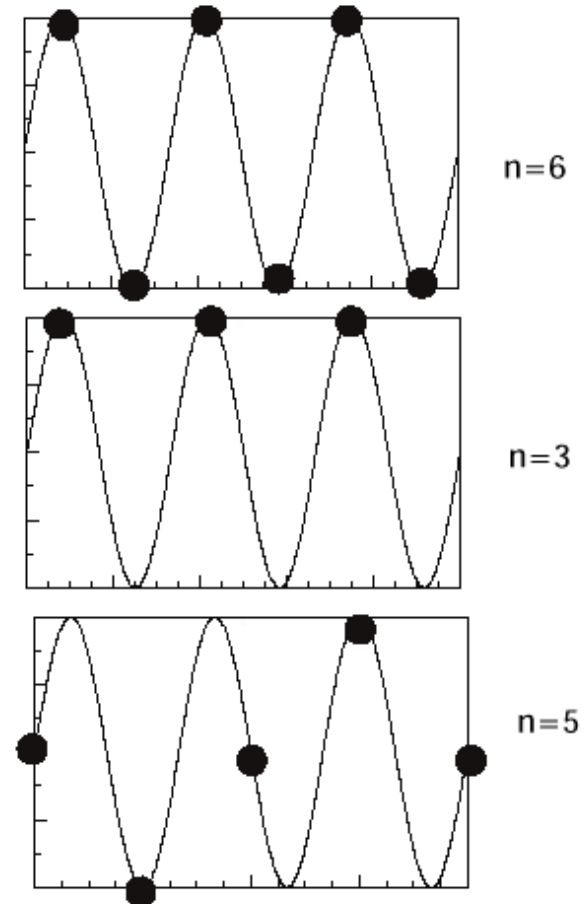
Jedna od često prisutnih grešaka je povezana za izborom brzine uzorkovanja i frekventnim spektrom signala koji se kodira. Ta greška se naziva alajasing.

U prikazanom slučaju, razmatra se analogni signal koji ima frekvenciju od 3Hz i prikazan je interval od 1 sekunde.

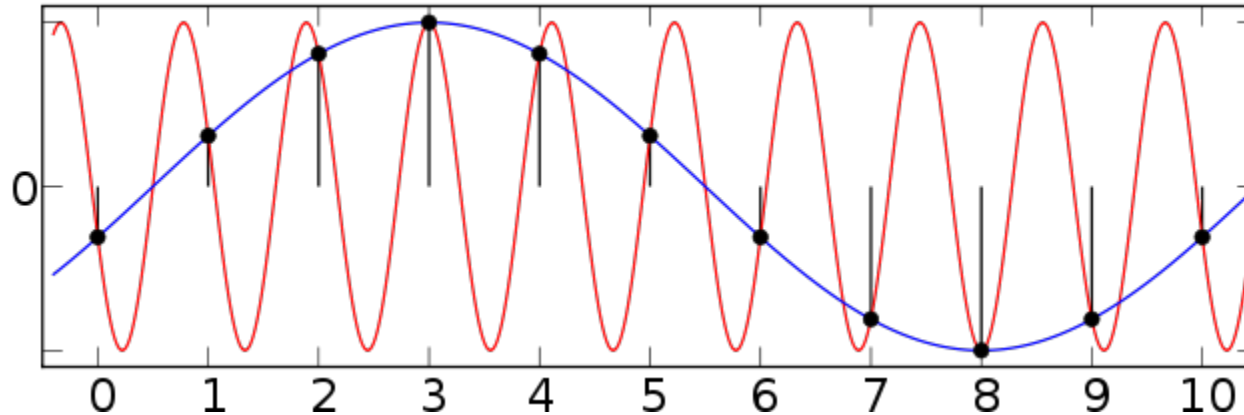
Ukoliko se vrši AD konverzija sa brzinom uzorkovanja od 6Hz (dva puta većom vrekvencijom od frekvencije signala), dobićemo verodostojno kvantovani signal.

Ukolikom međjutim, vršimo AD konverziju brzinom uzorkovanja od 3Hz dobićemo jednosmerni kvantovani signal. Ukoliko je brzina uzorkovanja 5 Hz dobićemo digitalni signal frekvencije 1Hz.

Problem se očigledno može rešiti pravilnim izborom frekvencije uzorkovanja. Osnovno pravilo je da brzina uzorkovanja mora da bude dva puta veća od najviše frekvencije koju želimo da obradjujemo (Šenononov kriterijum). U praksi se međjutim primenjuje mnogo rigoriznije pravilo prema kome brzina uzrkovanja mora da bude bar deset puta veća od frekvencije najvišeg harmonika.



I pored primene ovako rigoroznog uslova, problem alajasinga se ne može tako lako rešiti. Generalno, on i nema rešenje, pitanje je samo veličine greške koja se time pravi. Na sledećem grafiku je prikazan primer uzorkovanja signala u kome se posle digitalizacije prepoznaje prisustvo nepostojećeg harmonika koji ima 10 puta manju frekvenciju od stvarne frekvencije analognog signala.



Simbol za AD konvertor koji se koristi kod crtanja blok šema digitalnih sistema:



ELECTRICAL SYMBOL FOR ANALOG TO DIGITAL CONVERTER (ADC)

Digitalna obrada signala

Analogni signal koji je procesom AD konverzije preveden u ekvivalentan digitalni signal, može se obradivati primenom odgovarajućih matematičkih procedura na digitalnom računaru. Obrada ove vrste naziva se digitalna obrada signala.

Osnovni zadatak digitalne obrade analognog signala je njegovo prevodjenje u frekventni domen, a zatim sledi dalja obrada u okviru koje se 1) razmatra energija pojedinih komponenti signala po frekventnoj osi, čime se dobijaju određene vrste spektrograma i 2) filtracija signala koja podrazumeva potiskivanje ili isticanje pojedinih komponenti signala u njegovom frekventnom spektru. Digitalnom obradom se može sprovesti i inverzan proces, kada se signal iz fekventnog domena rekonstruise i vraća u vremenski domen.

Ključni matematički alat koji se koristi u digitalnoj obradi signala je Furijeova transformacija i konvolucija.

Furijeova transformacija

Furijeova transformacija je matematički alat kojim se signal iz vremenskog domena (intenzitet signala u funkciji vremena) prevodi u frekventni (intenzitet signala u funkciji frekvencije). Očigledno je da se ovom transformacijom gubi informacija o vremenu, odnosno promeni intenziteta signala u vremenu. To znači da je Furijeova transformacija pogodna samo za stacionarne signale odnosno signale čiji se spektar ne menja u vremenu.

Neka je sa $h(t)$ označen neki signal kao funkcija vremena. Furijeova transformacija je operator F koji prevodi ovaj signal iz vremenskog u frekventni domen, odnosno:

$$H(f) = F[h(t)]$$

Ukoliko je signal $h(t)$ iskazan u diskretnom obliku, onda se Furijeova transformacija svodi na svoj diskretan oblik, odnosno na diskretnu Furijeovu transformaciju (DFT). Primenom DFT operatora, diskretni vremenski signal se izražava kao njegova slika u frekventnom domenu, u obliku trigonometrijskog reda, koji čini konačna suma faktorizovanih trigonometrijskih funkcije sinusa i kosinusa, izvedenih nad ograničenim skupom diskretnih frekvencija:

$$h(t) = \sum_{n=0}^M a_n \sin(2\pi f_n t) + b_n \cos(2\pi f_n t)$$

Težinski faktori koji množe trigonometrijske funkcije definisani su sledećim relacijama:

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N h_k \sin(2\pi kn / N)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N h_k$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N h_k \cos(2\pi kn / N)$$

Teorema uzorkovanja i ostala praktična pitanja

Prvo pitanje koje se postavlja u primeni diskretne Furijeove transformacije je broj članova trigonometrijskog niza čijim će sumiranjem biti aproksimiran originalni signal u vremenskom domenu. Ovo pitanje je pitanje širine frekventnog spektra diskretnog vremenskog signala.

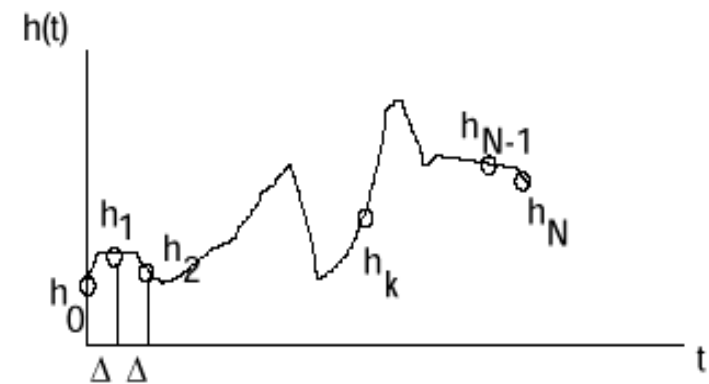
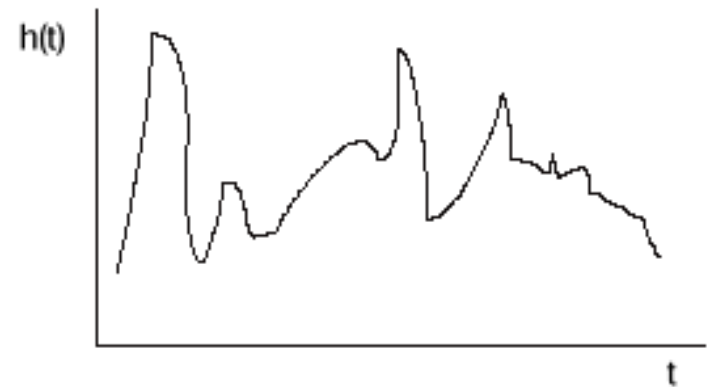
Širina frekventnog spektra merenog signala

odredjena je donjom i gornjom granicom. Gornju granicu frekventnog spektra predstavlja frekvencija najvišeg harmonika koji je u njemu sadržan.

Mereno signal se uvek reprezentuje kao skup diskretnih odmeraka:

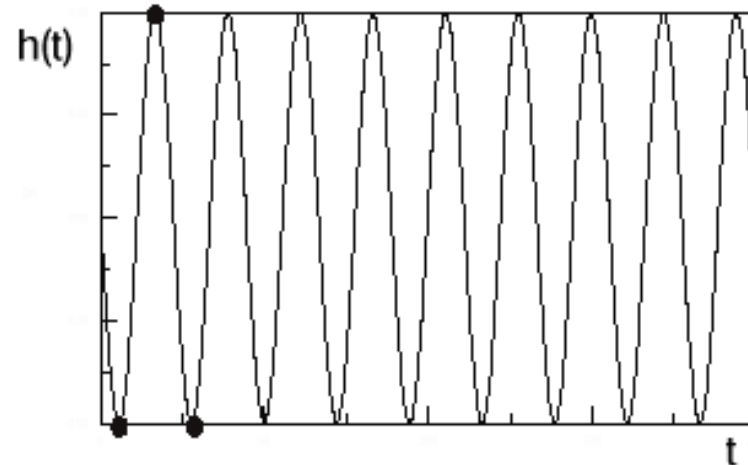
$$h(t) = \{ h_0, h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_N \}$$

a gornja granična frekvencija koju sadrži ovaj skup je odredjena brojem njegovih članova. Posebna teorema definiše ovu zavisnost i ona se naziva teoremom uzorkovanja.



Relaciju izmedju broja uzoraka i gornje granice frekventnog spektra sadržanog u ovom skupu, moguće je lako izvesti ukoliko se posmatra jedan prost harmonijski signal, odnosno signal koji se sastoji samo iz jedne harmonijske komponente sa poznatom frekvencijom.

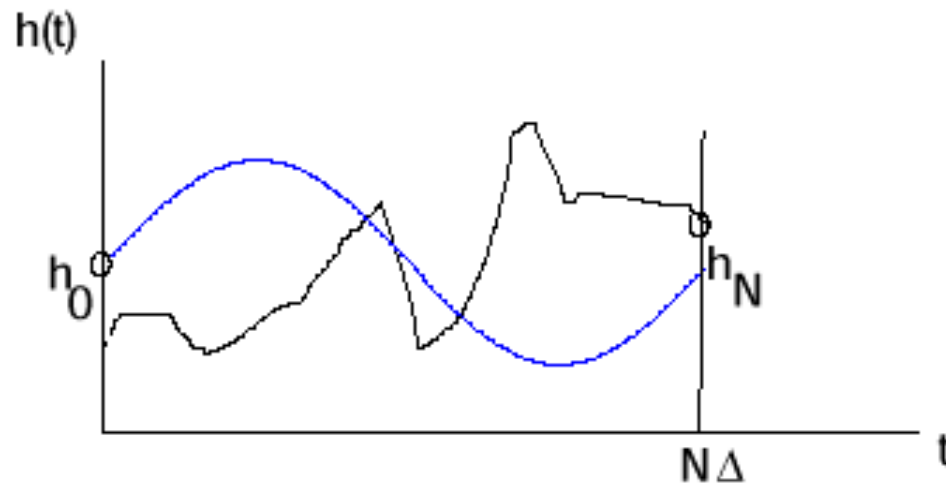
Da bi jednoznačno odredili parametre tog talasnog oblika, neophodne su nam i dovoljne dve tačke po periodu. Drugim rečima, ukoliko je vreme uzorkovanja našeg akvizicionog sistema ΔT , maksimalna frekvencija koju mi možemo da merimo jeste $f_{max} = 1 / (2 \Delta T)$. Ova frekvencija se zove Nyquist-ova frekvencija, a zavisnost koja je postavljena naziva se teoremom uzorkovanja.



Istovremeno, najniža frekventna komponenta koja je sadržana u merenom signalu je komponenta sa nultom frekvencijom, odnosno jednosmerna komponenta merenog signala.

I poslednji aspekt koji se treba obraditi odnosi se na frekventnu rezoluciju. Frekvencijska rezolucija određena je najdužom periodom koja se može upisati u prostor definisan vremenskom serijom uzoraka merenog signala, odnosno $\Delta f = 1 / N\Delta T$ gde je N ukupan broj uzorkovanih podataka, a $N\Delta T$ je dužina vremenskog intervala.

Pošto je $f_{max} = 1 / (2 \Delta T)$, postoji $N / 2$ različitih frekventnih komponenti.



Spektar snage

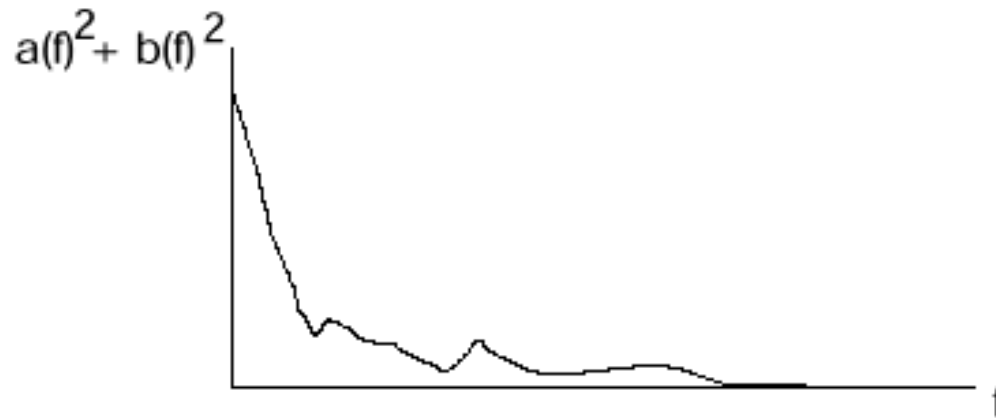
Spektar snage definiše raspodelu energije originalnog signala po frekvencijama njegovog spektra određenog diskretnom Furijeovom transformacijom.

a_n je težinski faktor, odnosno koeficijent intenziteta sinusne komponente na frekvenciji nf_0

b_n je težinski faktor, odnosno koeficijent intenziteta kosinusne komponente na frekvenciji nf_0 .

Ukupna energija signala na frekvenciji nf_0 je definisana relacijom:

$$P_n = |a_n|^2 + |b_n|^2$$



Furijeov red iskazan kompleksnim funkcijama

Furijeov red je ponekad pogodnije iskazati u kompaktnoj formi na bazi kompleksnih funkcija. Ovo se može učiniti ukoliko se iskoriste Ojlerove jednakosti:

$$\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$$
$$\sin(x) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}$$

Primenom prethodno navedenih jednakosti, polazna formulacija Furijeovog reda dobija novi oblik:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N/2} a_n \sin(2\pi n f_0 t) + b_n \cos(2\pi n f_0 t)$$

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N/2} a_n \frac{e^{j2\pi n f_0 t} - e^{-j2\pi n f_0 t}}{2j} + b_n \frac{e^{j2\pi n f_0 t} + e^{-j2\pi n f_0 t}}{2}$$

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N/2} \frac{b_n - ja_n}{2} e^{j2\pi n f_0 t} + \frac{b_n + ja_n}{2} e^{-j2\pi n f_0 t}$$

$$h(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \frac{b_n - ja_n}{2} e^{j2\pi n f_0 t} = \sum_{n=-N/2}^{N/2} c_n e^{j2\pi n f_0 t}$$

gde je:

$$c_n = \frac{b_n - ja_n}{2}$$

Brza Furijeova transformacija (FFT)

Izračunavanje Furijeovog reda je računski obiman zadatak. Poseban algoritam koji omogućava smanjenje potrebnog obima izračunavanja naziva se brza Furijeova transformacija. U stručnoj literaturi se ovaj oblik DFT označava sa FFT (Fast Fourier Transform). Najpoznatiji FFT algoritam za izračunavanje DFT je Cooley–Tukey algoritam i njegova najjednostavnija i najčešće korišćena forma RADIX-2. Poželjno je da vektor diskretnog vremenskog signala ima 2^n uzoraka.

Kratkotrajna Furijeova transformacija (STFT)

Prevodjenjem iz vremenskog u frekventni domen, gubi se vremenska dimenzija signala. Gubitak vremenske dimenzije nije značajan kod stacionarnih signala jer se kod ovih signala spektar njihov spektar ne menja u vremenu. Ipak, u praksi su mnogo češći slučajevi signala kod kojih se njihova spektralna karakteristika menja sa vremenom. Primena DFT u ovakvim situacijama dovodi do usrednjavanja frekventnog spektra i gubitka mnogih bitnih informacija koje prate dinamički proces. Na primer, proces rezanja je dinamički proces u kome se smenjuju različite faze formiranja strugotine, i shodno tome smenjuju se različiti spektralni sadržaji. Analizom promene spektra mogu se uočiti različite pojave, poput zatupljenja ili loma alata. Drugi primer je analiza govora, gde se takodje, sa izgovorom svakog glasa menja spektralni sastav signala u vremenu. Primenom DFT u ovom slučaju dolazi do usrednjavanja frekventnog spektra i nemogućnosti bilo kakve analize dinamičkih pojava.

DFT se do izvesne mere može učiniti osetljivom na vremenske promene spektra. Osnovna ideja je da se originalni vremenski signal pomnoži takozvanom prozorskom funkcijom koja će učiniti da se signal u svom pravom intenzitetu vidi samo u jednom suženom vremenskom intervalu, prozoru, dok se van tog intervala intenzitet signala postepeno potiskuje do nultog nivoa. Dobijeni spektralni sastav će se u ovom slučaju odnositi samo na interval koji je zahvaćen prozorom. Pokretanjem ovog prozora po vremenskoj osi originalnog signala i sukcesivnom primenom DFT dobiće se vremenski promenljiv spektar signala.

Širina prozorske funkcije određuje vremensku rezoluciju. Smanjivanje širine prozorske funkcije, odnosno smanjivanjem zahvaćenog vremenskog intervala originalnog signala, povećava se vremenska rezolucija, odnosno sposobnost STFT da precizno lokalizuje određeni spektralni sadržaj po vremenskoj osi.

Problem je u tome što se smanjivanjem vremenskog intervala smanjuje frekventna rezolucija, jer kako je to već ranije objašnjeno, vremenska rezolucija je određena širinom vremenskog intervala. Očigledno je da ovde postoji određena protivurečnost ili neodređenost koja se ne može razrešiti i u okviru koncepta Furijeove transformacije. Ova neodređenost se sastoji u tome da se povećavanjem vremenske rezolucije smanjuje frekventna rezolucija i obrnuto. Postoje druge transformacije koje bolje razrešavaju problem ove vrste.

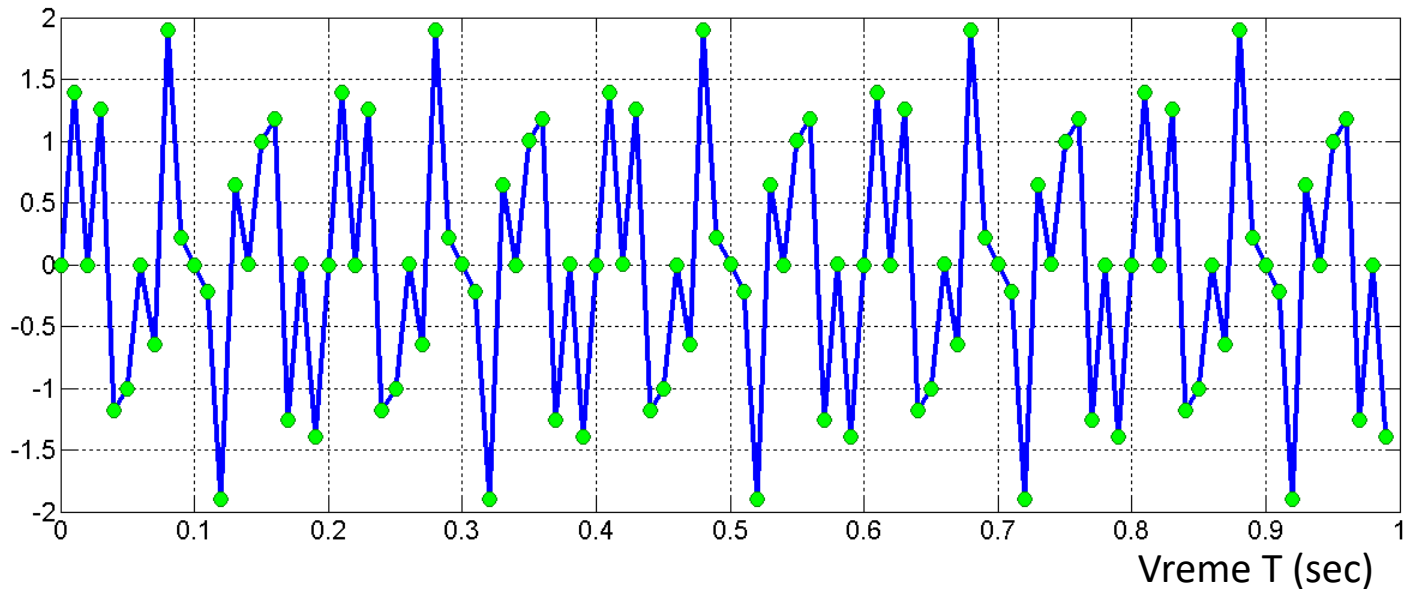
MatLab Signal Processing Toolbox

Primer #1: MATLAB sadrži funkciju FFT za izračunavanje diskretne Furijeove transformacije. Sledeći primer ilustruje primenu FFT rutine.

Prvo, treba formirati vremenski vektor i njemu pripadajući vektor signala:

```
T = 1;           % vremenski interval (sec)
Fs = 100;       % frekvencija uzorkovanja (Hz)
t = (0:1/Fs:T-1/Fs); % vremenski vektor
x = sin(2*pi*15*t) + sin(2*pi*40*t); % signal
plot(t,x, t,x,'o'), grid on
```

Diskretni
Vremenski
signal
 $x = x(nT)$



Na generisanom signalu u vremenskom domenu uočava se gubitak periodičnosti, koja nastaje kao posledica superponiranja dva harmonijska signala iste amplitude i frekvencija 15 i 40 Hz respektivno. Ipak, pažljivim posmatranjem može se uočiti sekvenca koja se precizno ponavlja.

DFT generisanog signala, izračunava se na sledeći način:

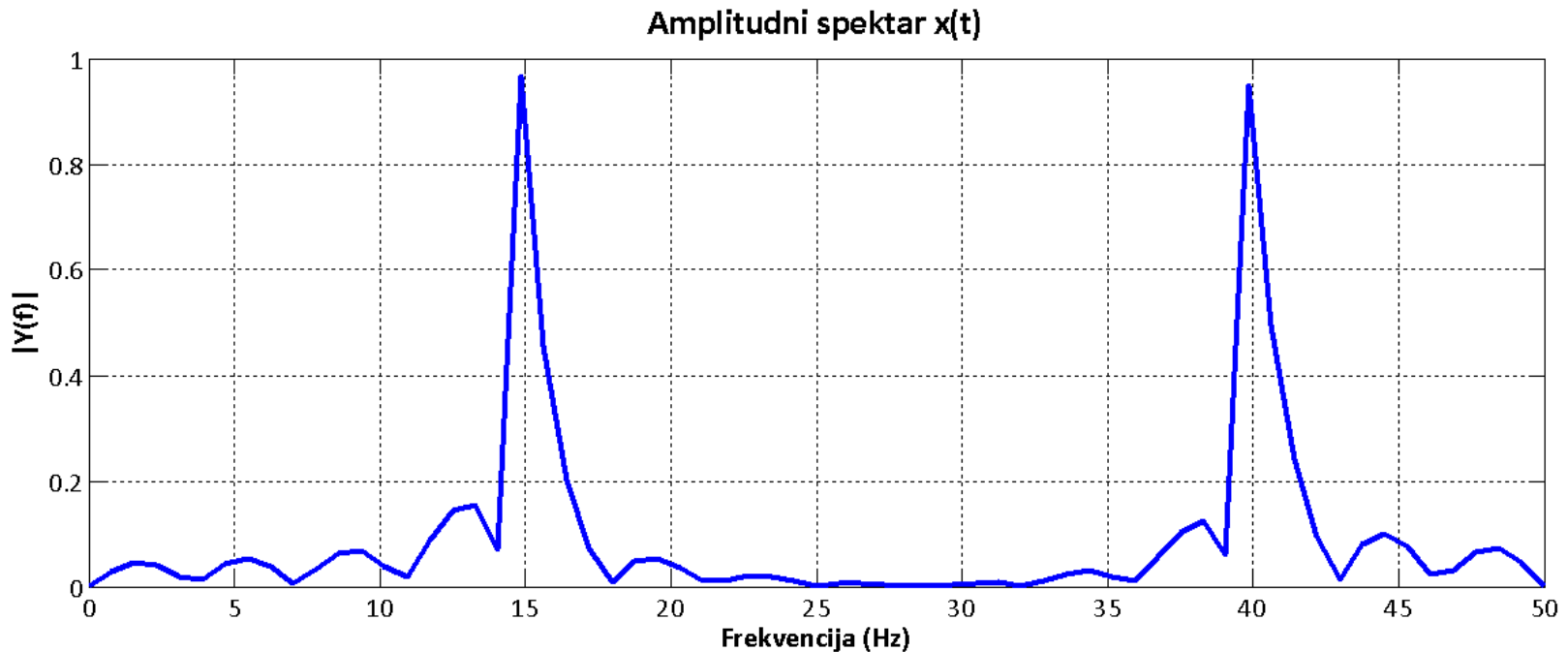
```
L=length(x);           %Dužina vektora signala
NFFT = 2^nextpow2(L);  % Proširivanje x na 2^n
Y = fft(x,NFFT)/L;     % Izračunavanje DFT
```

Prikaz dobijenog rezultata:

```
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % frekventni vektor
figure(1)
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Amplitudni spektar x(t)')
xlabel('Frekvencija (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
```

Na prikazu izračunatog spektra signala $x(t)$ uočava se sledeće:

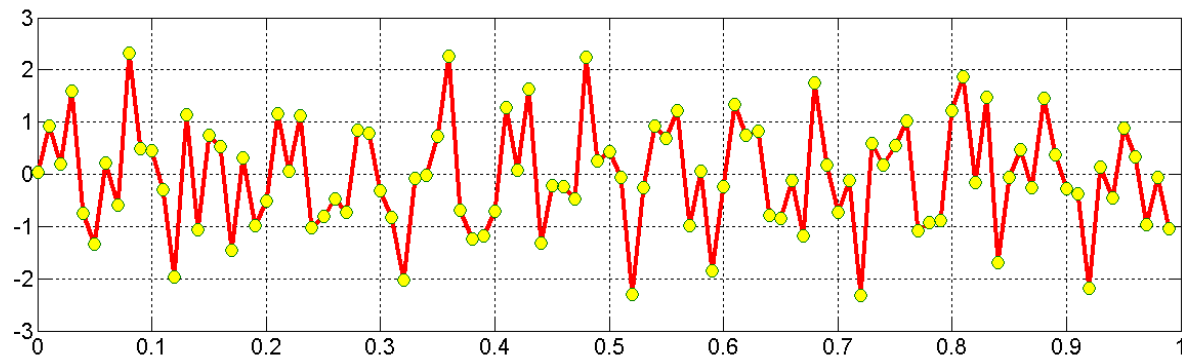
1. Frekventni opseg analiziranog signala je 0 do 50 Hz, što je u skladu sa Najkvistovim uslovom, jer je broj diskretnih uzoraka vremenskog signala bio 100.
2. Jasno se uočavaju dve ekstremne vrednosti na 15 i 40 Hz, čime se potvrđuje verodostojnost sprovedene frekventne analize, jer je generisani signal sadržao upravo ove dve komponente u obliku idealnih harmonijskih signala.
3. Uočava se prisustvo ostalih komponenti u frekventnom spektru, što ukazuje na nesavršenost DFT algoritma. Posebno je karakteristično prisustvo u blizini dominantnih harmonika, što se naziva 'curenje spektra'.



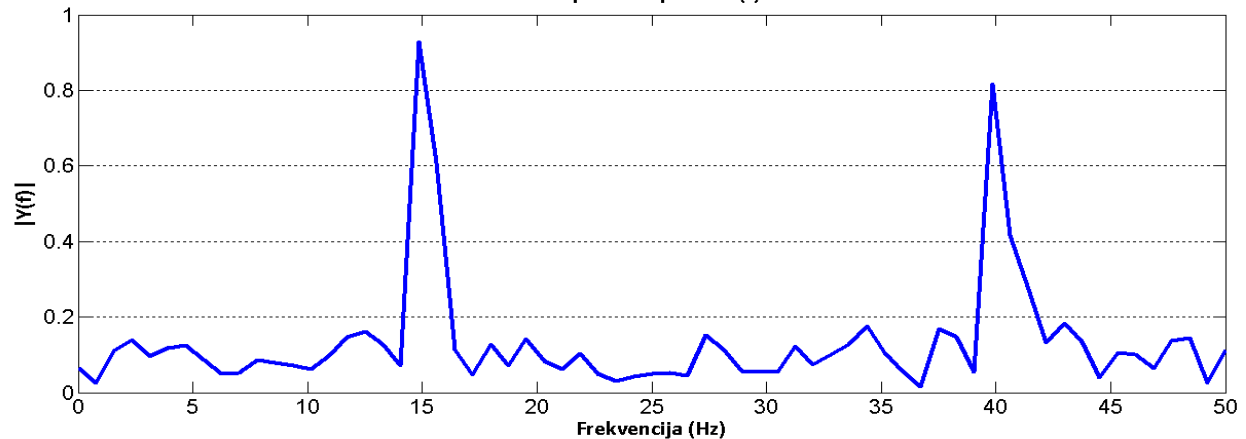
Upotrebljivost DFT alata se može proveriti uvođenjem slučajnog signala, belog šuma amplitude 50% originalnog signala.

```
x = x + 0.5*randn(size(t)); %signal kontaminiran šumom
```

U vremenskom domenu uočava se drastična promena forme signala, koja je posledica doatog poremećaja u obliku šuma. Bez obzira na ovakvu kontaminaciju, DFT algoritam i dalje prepoznaje dva osnovna harmonika.



Amplitudni spektar x(t)



Intenzitet se po pravilu iskazuje u decibelima (dB) pri čemu važi:

$$Y_{db} = 20 \cdot \log_{10}(Y).$$

Matlab ima posebnu funkciju kojom se vrši ova konverzija:

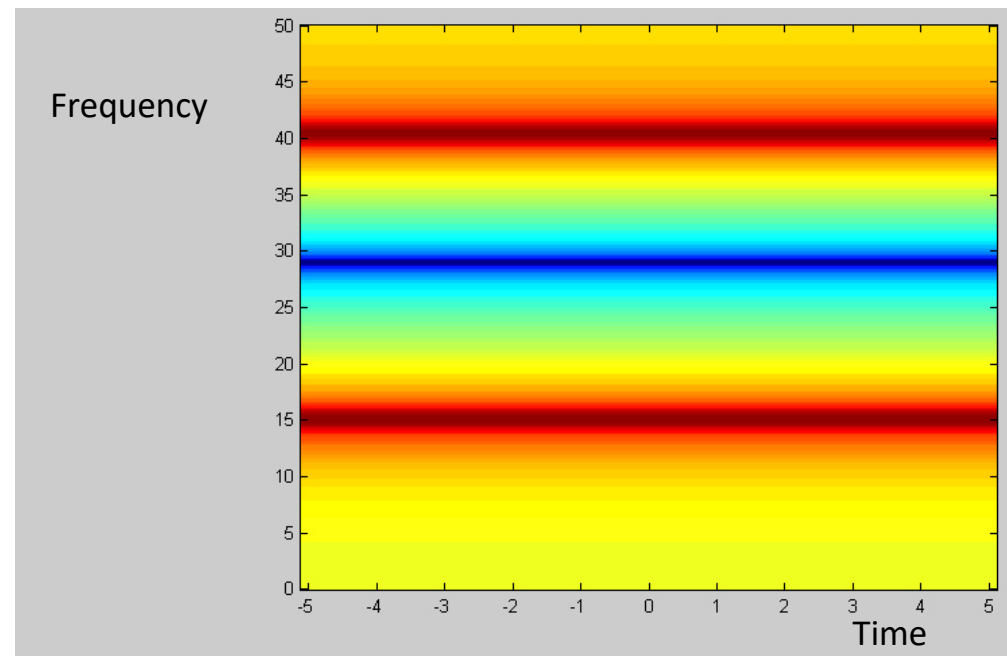
```
Y_db = mag2db(Y);
```

Spektrogram – analiza nestacionarnih vremenskih serija

The time-dependent Fourier transform is the discrete-time Fourier transform for a sequence, computed using a **sliding window**. This form of the Fourier transform, also known as the short-time Fourier transform (STFT), has numerous applications in transient processes analysis. The spectrogram of a sequence is the magnitude of the time-dependent Fourier transform versus time. To display the spectrogram of previously analyzed time signal:

```
specgram(x, 512, 100, hanning(256), 128)
```

Color code is used to show magnitude (a third axis) for each frequency content along the frequency axis. Since the original signal x is not time dependant (in term of frequency), the plot has constant value along the time axis. Red color belongs to the highest magnitude, while blue color belongs to the lowest magnitude. Compare this plot with previously estimated psd.



Example #2: Cutting force analyzing – Case I

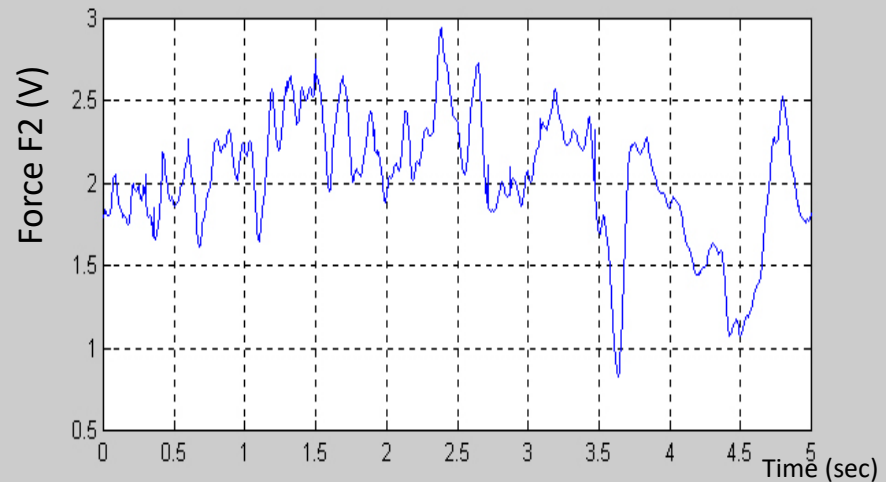
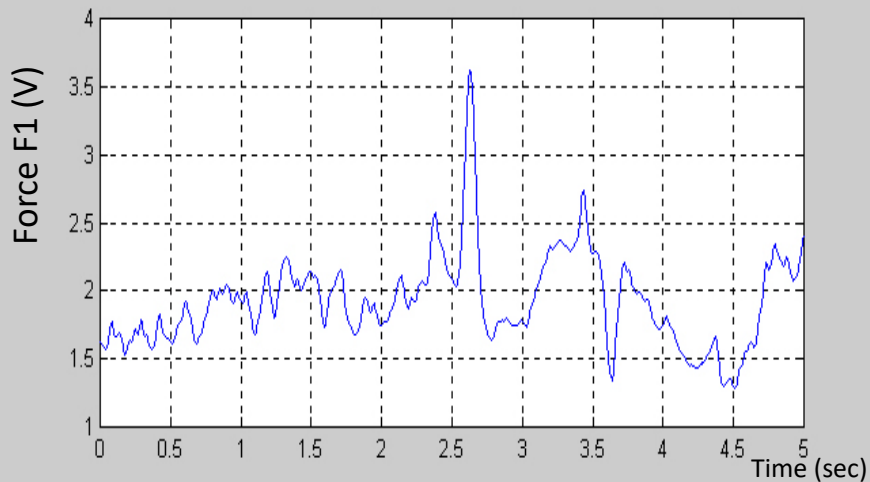
Machine: Late

Workpiece: 78 x 200 (diameter x length) Material: mild steel

Cutting depth: 1 mm; Feed rate: 0.1 mm/rev; Cutting speed: 50 rev/min

Data file: fml_m13m.dat (ASCII file with three data columns); Sampling fr.: 400Hz

```
load fml_m13m.dat %Importing data file into Matlab workspace
t=(fml_m13m(:,3)); %Time vector
f1=(fml_m13m(:,1)); %Cutting force F1 vector f2=(fml_m13m(:,2));
% Cutting force F2 vector
figure(1), plot(t,f1), grid on
figure(2), plot(t,f2), grid on
```



Frequency spectrum

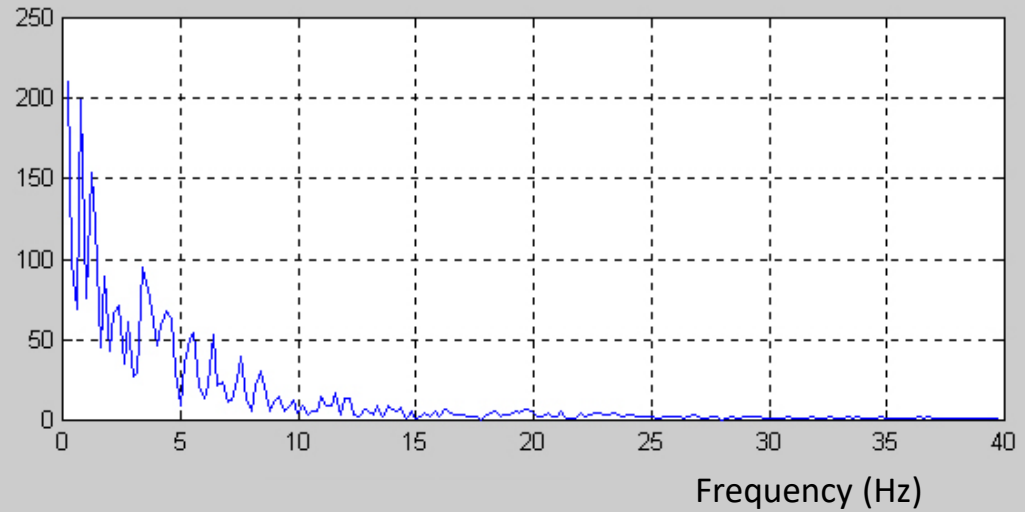
The DFT of the cutting force signal, and the magnitude and phase of the transformed sequence, are then:

```
F1 = fft(f1); % Compute DFT of f1 signal
F2 = fft(f2); % Compute DFT of f2 signal
m1=abs(F1); p1=unwrap(angle(F1)); % mag. and phase of f1
m2=abs(F2); p2=unwrap(angle(F2)); % mag. and phase of f2
```

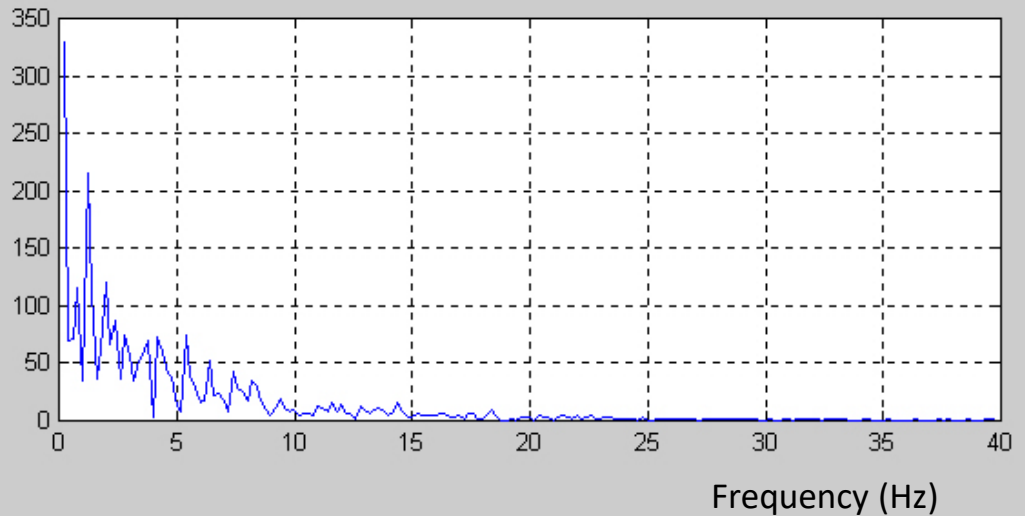
To plot the magnitude:

```
fr = (0:length(F1)-1)*400/length(F1); % frequency vector
figure(1), plot(fr(2:200),m1(2:200)), grid on
figure(3), plot(fr(2:200),m2(2:200)), grid on
```

Intenzitet F1



Intenzitet F2

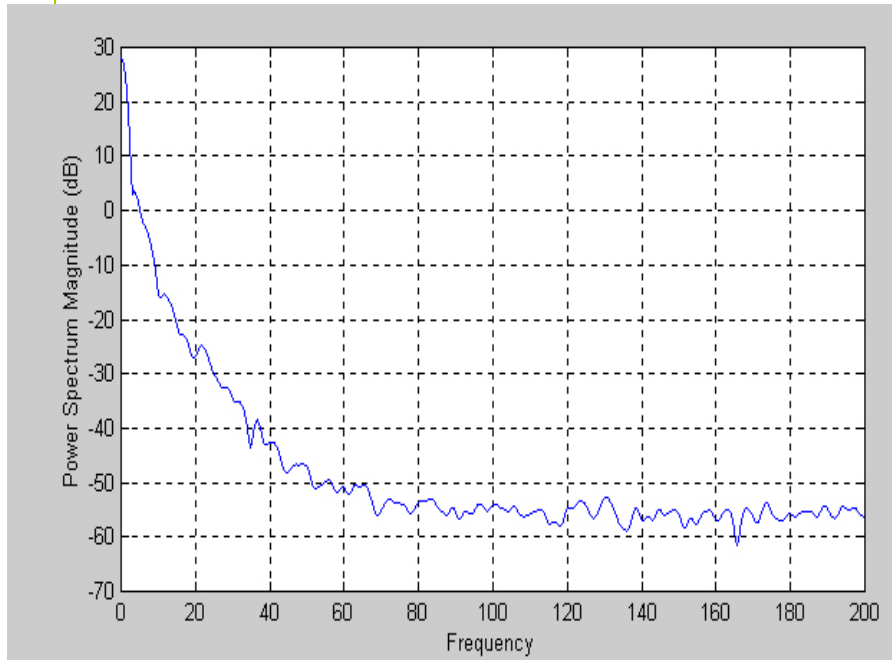


Power density spectrum

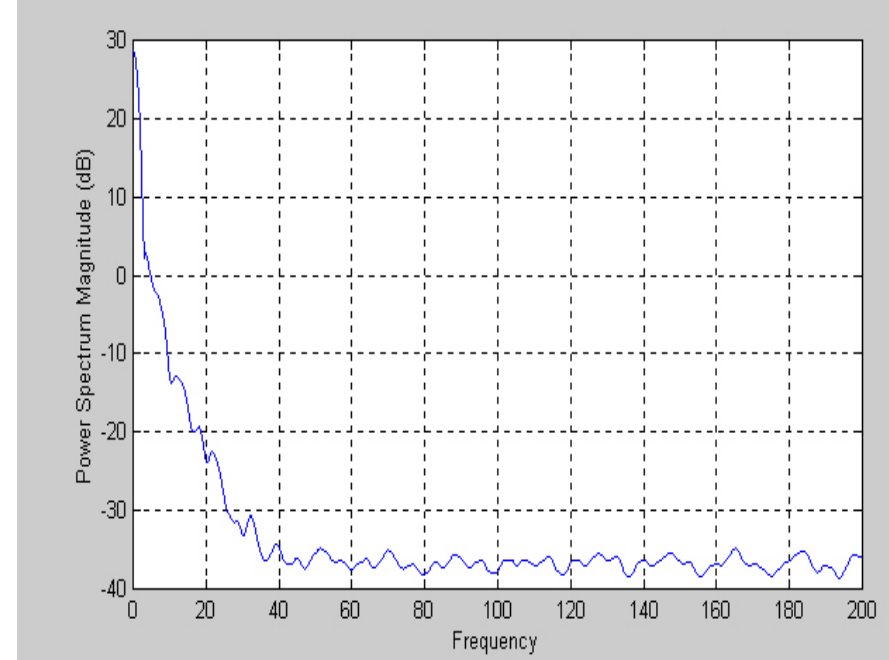
Estimating the power spectrum of a measured cutting force signal:

```
figure(1), psd(f1,1024,400,hanning(256),128,'none')
```

```
figure(2), psd(f2,1024,400,hanning(256),128,'none')
```



Force F1



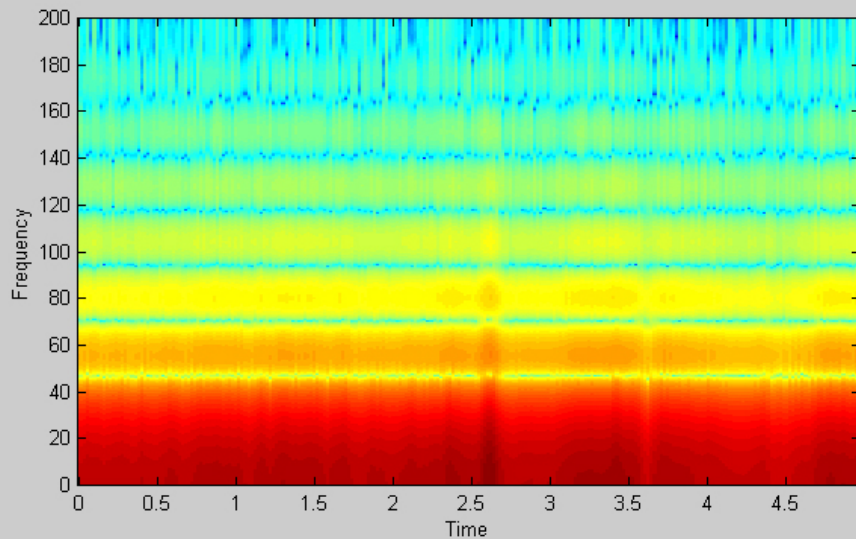
Force F2

Time-dependant Power Density Spectrum

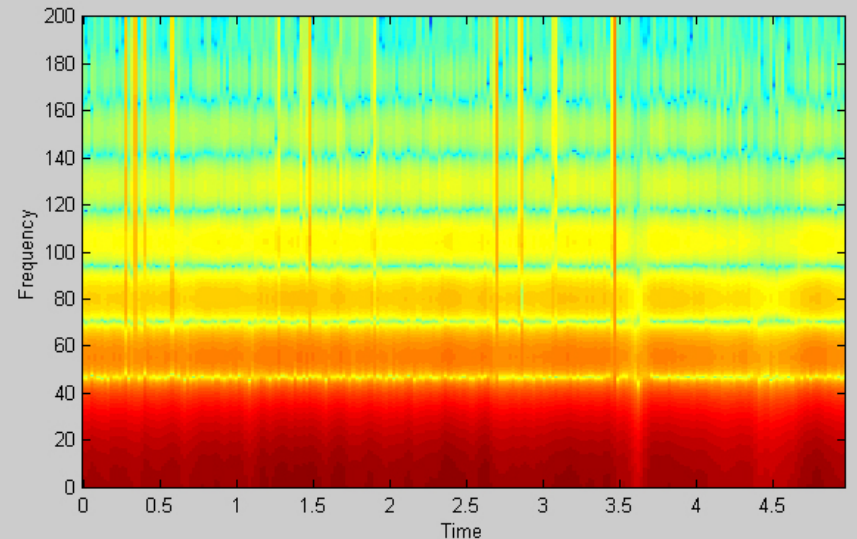
The time-dependent Fourier transform is:

```
figure(1), specgram(f1,4096,400,hanning(16),8)
```

```
figure(2), specgram(f2,4096,400,hanning(16),8)
```



Spectrogram of the force F1



Spectrogram of the force F2

Machine: Late

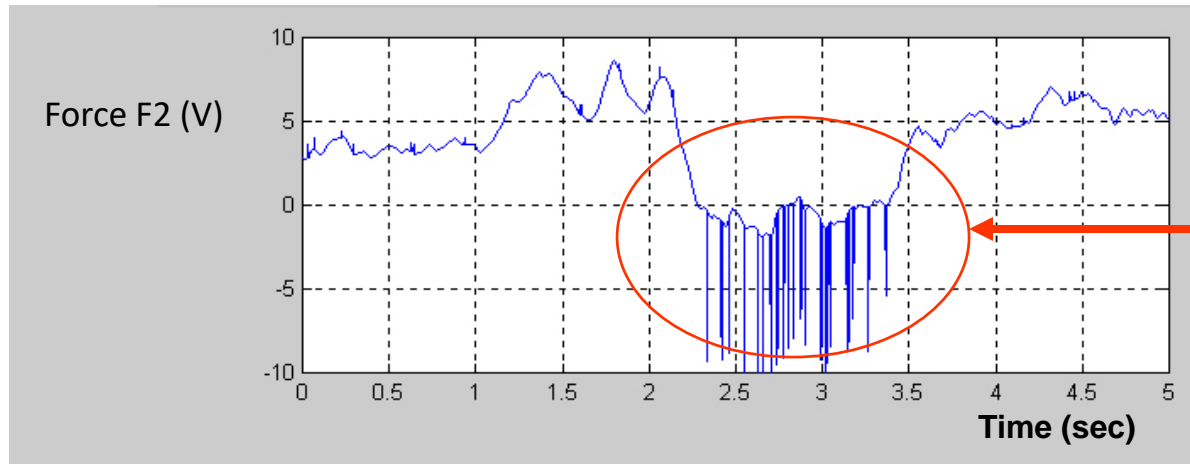
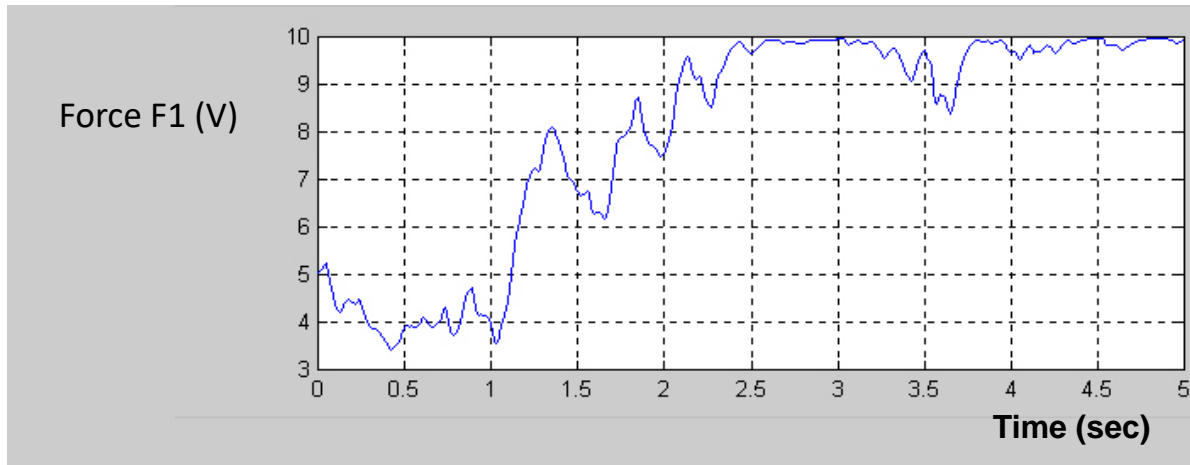
Workpiece: 78 x 200 (diameter x length) Material: mild steel

Cutting depth: 1 mm; Feed rate: 0.4 mm/rev; Cutting speed: 50 rev/min

Data file: fml_m13m.dat (ASCII file with three data columns); Sampling fr.: 400Hz

Case II

```
load fml_m14m.dat %Importing data file into Matlab workspace
t=(fml_m14m(:,3)); f1=(fml_m14m(:,1)); f2=(fml_m14m(:,2));
figure(1), plot(t,f1), grid on, figure(2), plot(t,f2), grid on
```



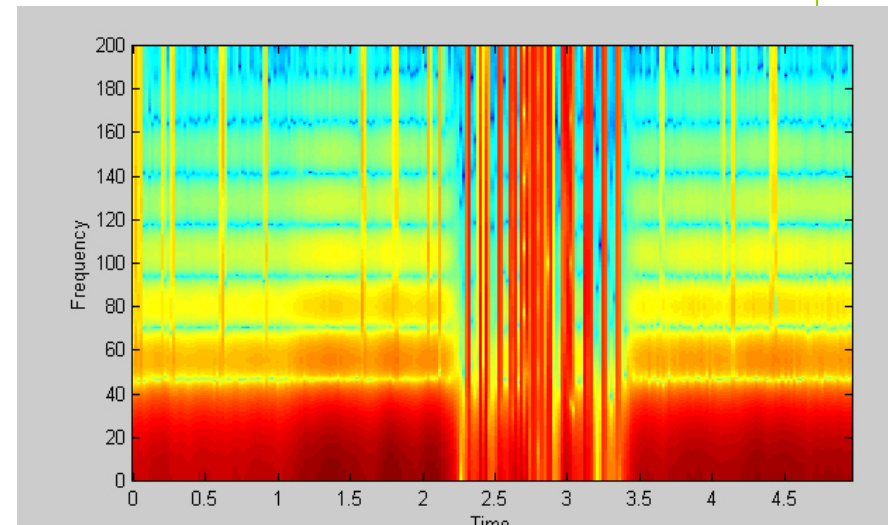
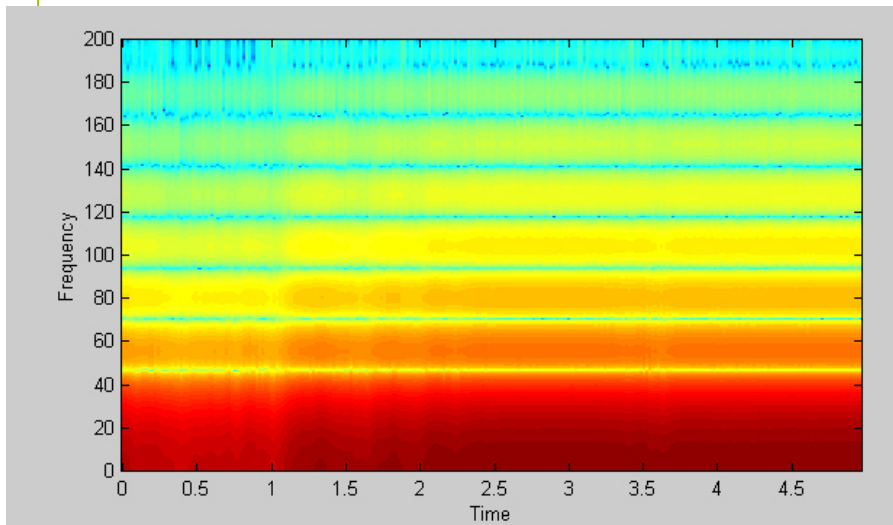
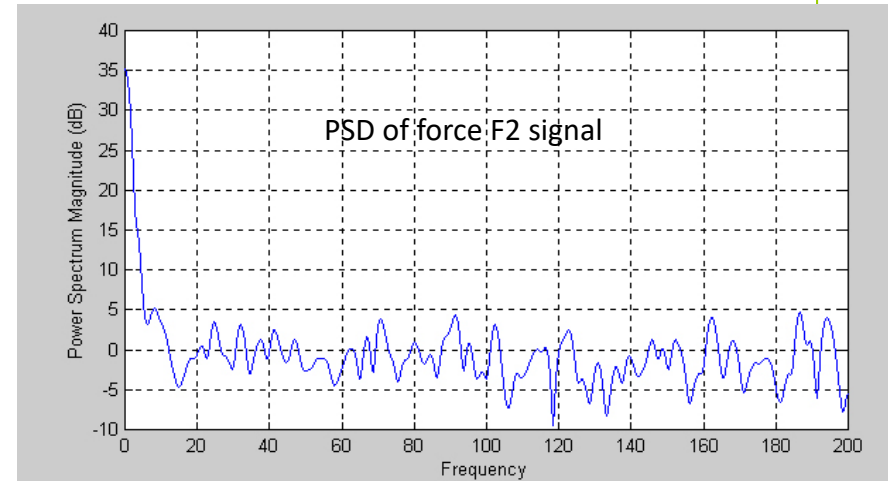
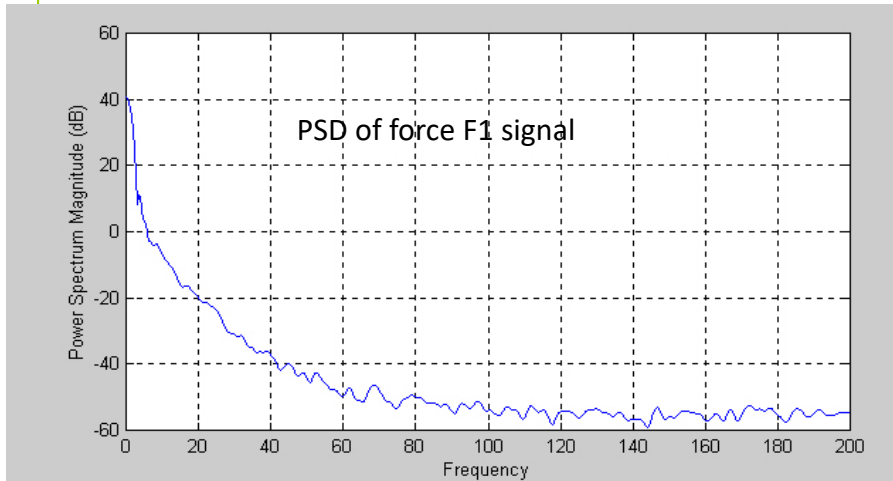
Estimating the power spectrum density and spectrogram of a measured cutting force signal:

```
figure(1), psd(f1,1024,400,hanning(256),128,'none')
```

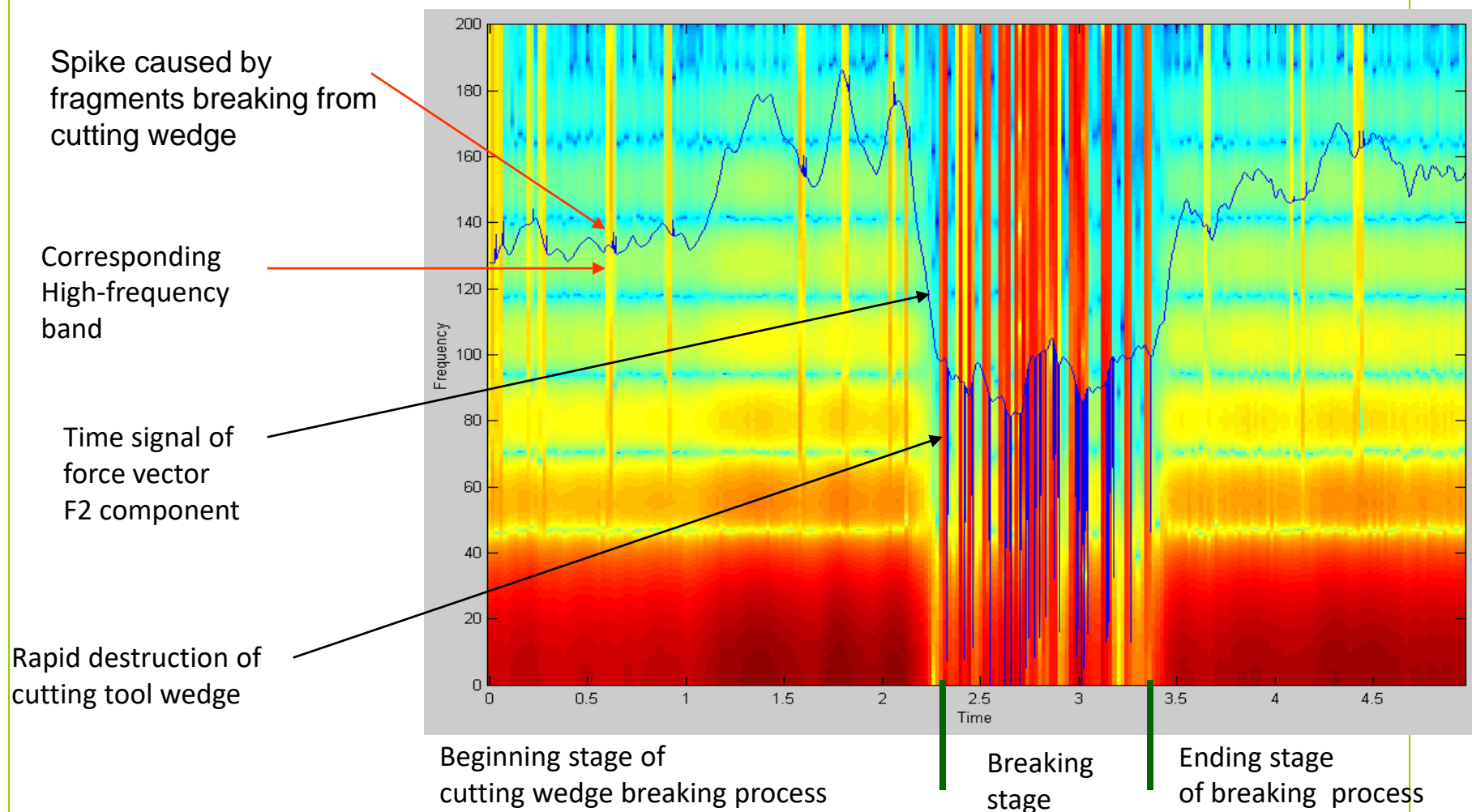
```
figure(2), psd(f2,1024,400,hanning(256),128,'none')
```

```
figure(3), specgram(f1,4096,400,hanning(16),8)
```

```
figure(4), specgram(f2,4096,400,hanning(16),8)
```



Tool braking is difficult to see in psd plot. Time information is lost, and only average growth of high-frequency content can be seen. At the opposite, spectrogram clearly shows the complete history of tool breaking process. First, the beginning of tool breaking process, with presence of short time high frequency impulses (yellow bands in the interval of 0 – 2.3 sec.) that corresponds to initial fracture creation together with fragments break away. After that, total destruction of cutting tool wedge (intensive growth of high frequency content in the interval of 2.3 up to 3.4 sec.). And finally, breaking remaining fragments of tool wedge (3.4 up to 5 sec.).



Example #3: Bearing failure detection

A bearing may fail for a number of reasons; ineffective lubrication, contaminated lubrication, heavier loading than anticipated, improper handling or installation, old age (surface fatigue), etc. Often, initial bearing fatigue results in shear stresses cyclically appearing immediately below the load carrying surface. After a time these stresses cause cracks which gradually extend up to the surface. As a rolling elements pass over these cracks, fragments break away. This is known as spalling or flaking. The spalling progressively increases and eventually makes the bearing unusable. This type of bearing damage is a relatively long drawn-out process, and makes its presence known by increasing noise and vibration.

Another type of bearing failure is initiated by surface distress. Surface distress causes cracks to form on the surface and grow into the material. Surface distress is usually caused by excessive load or improper lubrication.

In both cases the failing **bearing produces noise and vibration signals** that, if detected, usually gives the user adequate time to correct the cause of the bearing problem or replace the bearing before it fails completely.

Bearing vibration analysis

As previously mentioned, there are many machinery problems that can contribute to bearing failure. The most prevalent are excessive load caused by misalignment and/or imbalance, and lubrication problems (lack of lubrication, improper lubrication, excessive lubrication, and contaminated lubrication). Others include:

- Defective bearing seats on shafts and in housings.
- Faulty mounting practice.
- Incorrect shaft and housing fits.
- Vibration while the bearing is not rotating.
- The passage of electric current through the bearing.

Velocity vibration measurements are typically performed on most machinery. These measurements are very useful for detecting and analyzing low frequency rotational problems such as imbalance, misalignment, looseness, bent shaft, etc.

Bearing frequencies

To assist in determining if a machine's problems include a faulty bearing, the defect frequencies of the bearing can be calculated and overlaid on the vibration spectra:

Ford - Frequency Outer Race Defect

$$F_{ord} = N / 2 \times n / 60 \times (1 - Bd / Pd \times \cos(\phi))$$

Fird - Frequency Inner Race Defect

$$F_{ird} = N / 2 \times n / 60 \times (1 + Bd / Pd \times \cos(\phi))$$

Fbd - Frequency Ball Defect

$$F_{bd} = N / 2 \times n / 60 \times (1 - (Bd / Pd)^2 \times \cos^2(\phi))$$

Fc - Frequency Cage

$$F_c = 1 / 2 \times n / 60 \times (1 - Bd / Pd \times \cos(\phi))$$

where: N = Number of balls; n = number of rotations per minute;

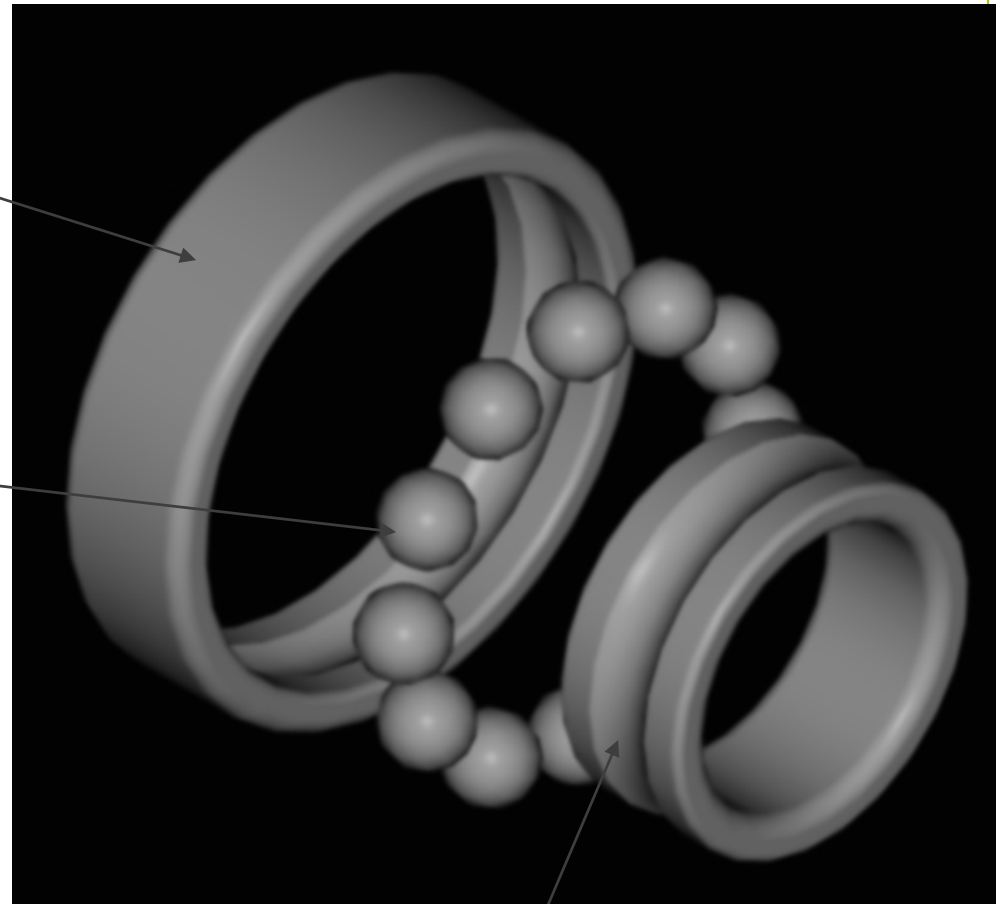
Bd = Ball diameter; Pd = Pitch diameter; phi = contact angle

When the defect frequencies (Ford, Fird, Fbd, Fc) align with peak amplitudes in the vibration spectrum, there is probably a bearing defect.

Outer Ring

Rolling Element

N rolling elements having diameter, (B_d), are equally spaced on pitch diameter, (P_d), i.e., imaginary circle drawn through the rolling elements center of rotation.

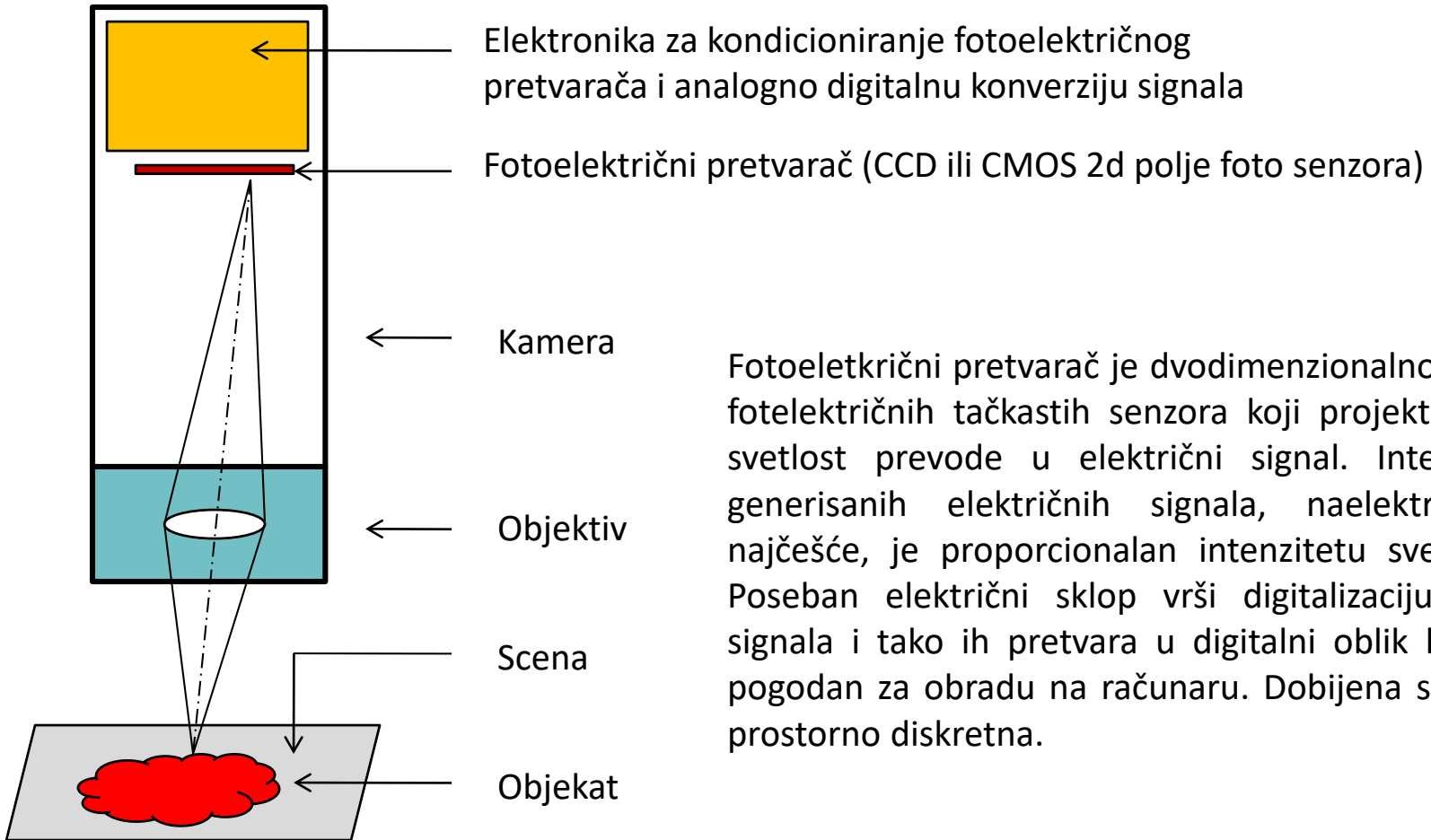


Inner Ring

b5: sistemi veštačkog gledanja

Digitalna slika

Svetlost koja se reflektuje od nekog objekta fokusira se pomoću objektiv (sklop sočiva) na fotosenzitivni elemenat, koji optičku informaciju pretvara u električne signale.



Fotoelektrični pretvarač je dvodimenzionalno polje fotoelektričnih tačkastih senzora koji projektovanu svetlost prevode u električni signal. Intenzitet generisanih električnih signala, naelektrisanje najčešće, je proporcionalan intenzitetu svetlosti. Poseban električni sklop vrši digitalizaciju ovih signala i tako ih pretvara u digitalni oblik koji je pogodan za obradu na računaru. Dobijena slika je prostorno diskretna.

Digitalizovani signal sa fotoelektričnog pretvarača smešta se u matičnu formu. Svakom elementu matrice odgovara jedan fizički elemenat realne slike. Ovaj elemenat se naziva **piksel** (*picture element*).

Piksel je najmanji fizički adresabilni elemenat slike, odnosno najmanji elemenat slike na koji se može uticati i kojim se može manipulirati.

Dakle, digitalna slika je organizovani skup piksela matematički iskazan u obliku matrice:

$$F = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,n) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(m,1) & f(m,2) & \dots & f(m,n) \end{bmatrix}$$

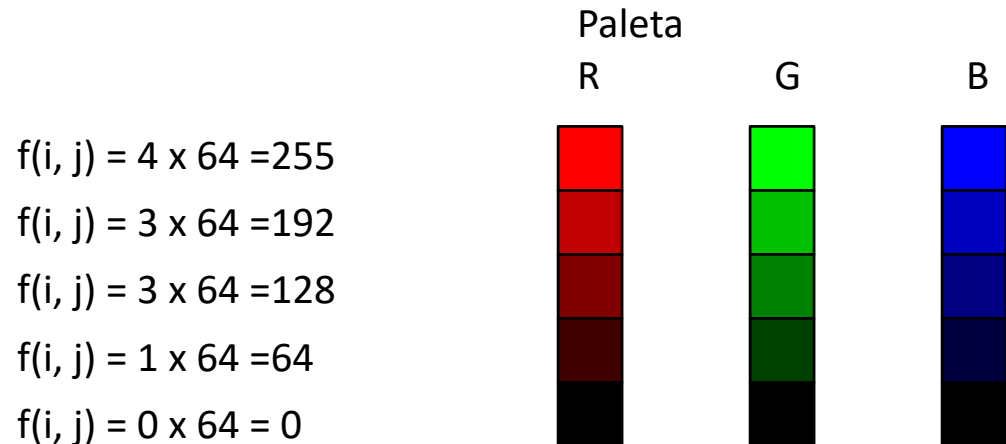
Digitalna slika je diskretizovana prostorno, a rezolucija, odnosno veličina prostornog kvanta je određena relativnom veličinom piksela, ili brojem piksela po jedinici površine.

Pored prostorne diskretizacije, digitalna slika sadrži i diskretizaciju po intenzitetu osvetljenosti svakog piksela. Ukupni interval osvetljenosti, deli se na konačan broj diskretnih kvantova, a intezitet svakog kvanta se binarno kodira. Rezolucija od 4 bita znači da je ukupan interval osvetljenosti podeljen na 2^4 kvanta. Najčešće se koristi osmobitna rezolucija, pre svega zbog pogodnosti da se osvetljenost svakog piksela iskaže jednim bajtom. Tada je kompletan interval osvetljenosti diskretizovan na $2^8 = 256$ nivoa.

Razlikujemo tri osnovna oblika digitalne slike:

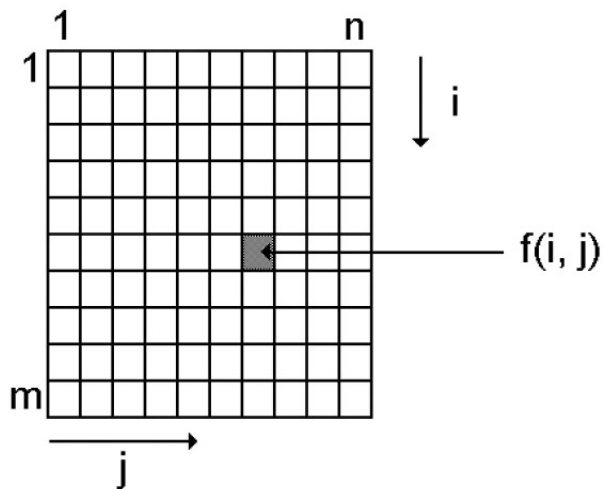
- 1.Kolor digitalna slika (RGB slika),
- 2.Monohromatska digitalna slika, i
- 3.Binarna digitalna slika.

Kod kolor digitalne slike svaki piksel je definisan intenzitetom tri fizički nezavisna kanala pomoću kojih se može iskazati svaka nijansa boje u vidljivom delu spektra – crvena, zelena i plava. Kolor digitalna slika se sastoji iz **tri matrice F_R , F_G i F_B** , u kojima se nalaze informacije o intenzitetu osvetljenosti po pojedinim kanalima koji definišu boju i intenzitet osvetljenosti svakog piksela.



U ovom slučaju osvetljenost svakog piksela definisana je sa 3 bajta (256 nivoa osvetljenosti po svakom kanalu).

Ukidanjem informacije o boji piksel se iskazuje samo ukupnim intenzitetom svetlosti, odnosno intenzitetom koji se dobija sabiranjem intenziteta sve tri komponente slike u boji. Na ovaj način se kolor slika svodi na monohromatsku koja se najčešće iskazuje kao niz (paleta) nijansi u intervalu [crno, belo] (*gray scale image*). **Svodjenje kolor na monohromatsku sliku izvodi se prostim sumiranjem intenziteta svih kolor kanala: $F = (F_R + F_G + F_B) / 3$.**



$$f(i, j) = 4 \times 64 = 255$$

$$f(i, j) = 3 \times 64 = 192$$

$$f(i, j) = 2 \times 64 = 128$$

$$f(i, j) = 1 \times 64 = 64$$

$$f(i, j) = 0 \times 64 = 0$$

Paleta sivog



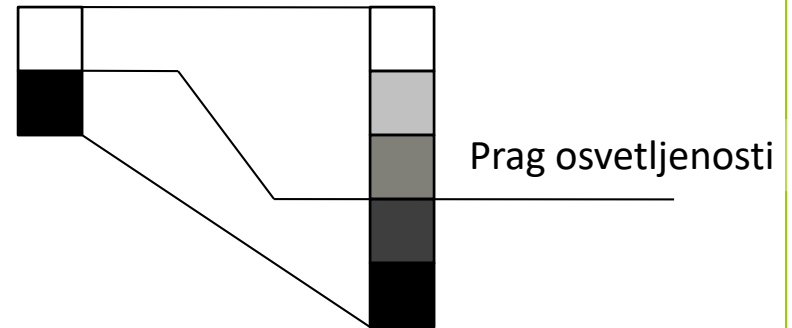
U ovom slučaju osvetljenost svakog piksela definisana je jednim bajtom (256 nivoa sivog).

Ukoliko se monohromatska paleta redukuje samo na dva diskretna nivoa (crno, belo), onda se dobija binarna slika. Kod binarne slike svaki piksel može da ima dva diskretna nivoa osvetljenosti: 0 (crno, neosvetljen) i 1 (belo, osvetljen). Binarna slika je najprostiji oblik digitalne slike. Kod konverzije monohromatske u binarnu sliku bitno je definisati prag osvetljenosti koji razdvaja dva diskretna nivoa.

$$f(i, j) = 4 \times 64 = 255$$

$$f(i, j) = 0 \times 64 = 0$$

Paleta



U ovom slučaju osvetljenost svakog piksela definisana je jednim bitom.

Obrada digitalne slike

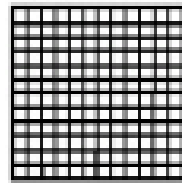
Obrada digitalne slike po pravilu započinje morfološkim transformacijama. Perspektiva i neortogonalni uglovi optičke ose objektiva u odnosu na scenu, deformišu relativne geometrijske odnose objekata na sceni. Pre svega, gubi se ortogonalnost ili paralelnost, pa se tako pravougaonici pretvaraju u rombove, a krugovi u elipse. Korekcije ove vrste se ostvaruju morfološkim transformacijama matrice F .

Takodje, bitne su i morfološke transformacije kojima se koriguju izobličenja nastala kao posledica prisustva različitih nesavršenosti optičkog sistema (takozvane optičke aberacije, odnosno nelinearna geometrijska izobličenja). Korekcije ove vrste se ostvaruju nelinearnim morfološkim transformacijama matrice F .

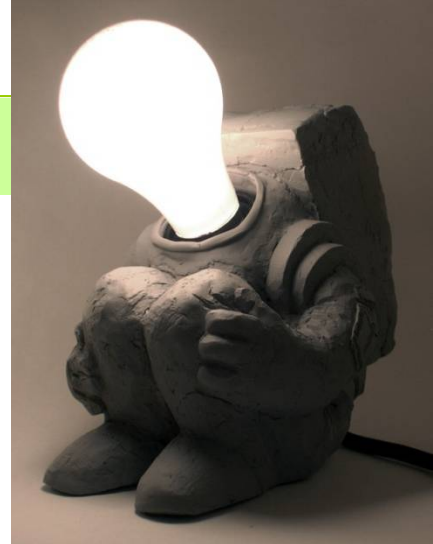
Na kraju, značajne su i greške koje dolaze od sistema optoelektroničkog pretvarača digitalne kamere, nesavršenostima akvizicionog sistema, i poremećajima ambijentalnog tipa koji nastaju kao posledica neadekvatnog osvetljenja ili spekularnim refleksijama od površine objekta koji se posmatra, kao i od pripadajućeg okruženja. Korekcije ove vrste grešaka se vrlo teško koriguju. U slučaju gubitka sadržaja, njih je nemoguće korigovati, one su trajne.

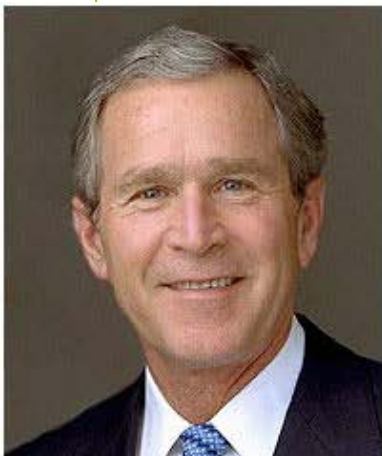
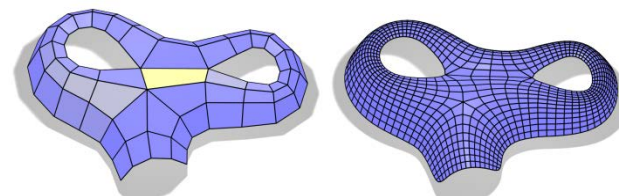
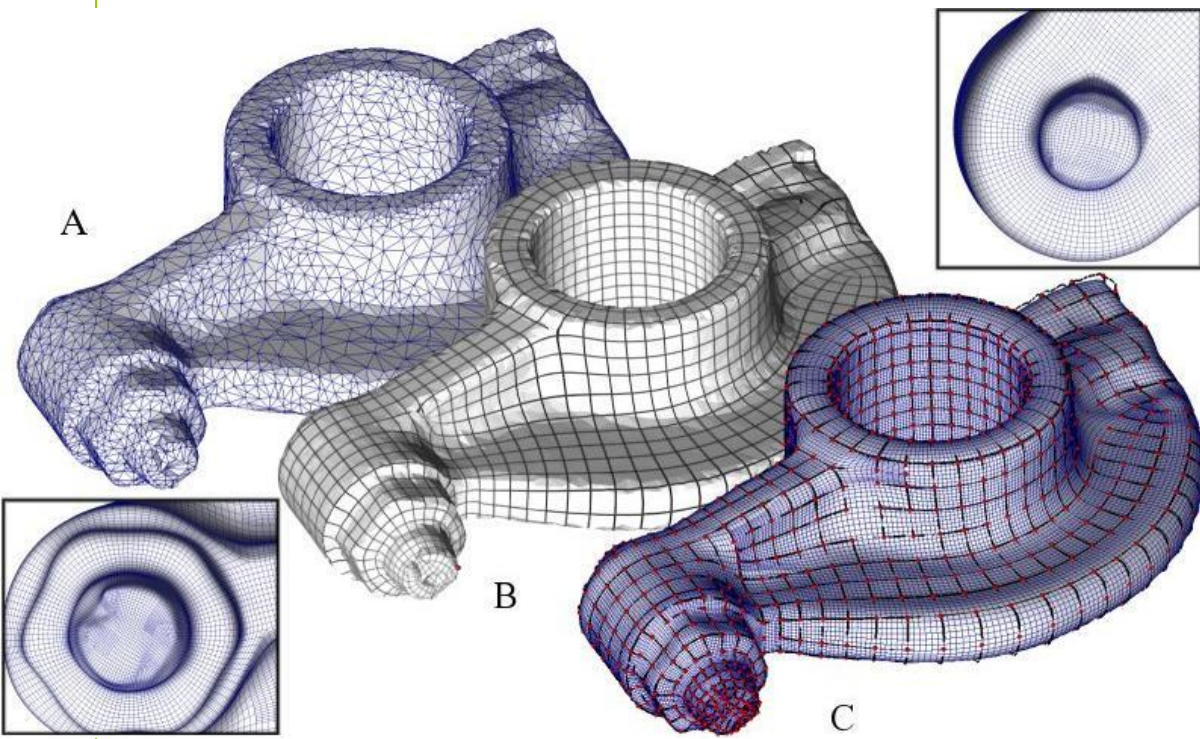
Dalje, pod obradom digitalne slike (*digital image processing*) podrazumevamo sprovođenje različitih matematičkih (aritmetičkih i logičkih) operacija nad matricom F . Matematičkim operacijama transformiše se polazna (originalna) matrica u njoj ekvivalentne oblike, pri čemu se postižu željeni efekti u smislu potiskivanja (brisanja) i naglašavanja pojedinih piksela ili grupe piksela u skladu sa unapred poznatim logičkim ili aritmetičkim relacijama. Za zadatak uvodjenja delova u proces bitne su operacije filtriranja, ekvalizacije, segmentacije i identifikacija ivičnih tačaka i kontura.

Taksonomija morfoloških transformacija



	rigid	affine	projective	curved
global				
local				

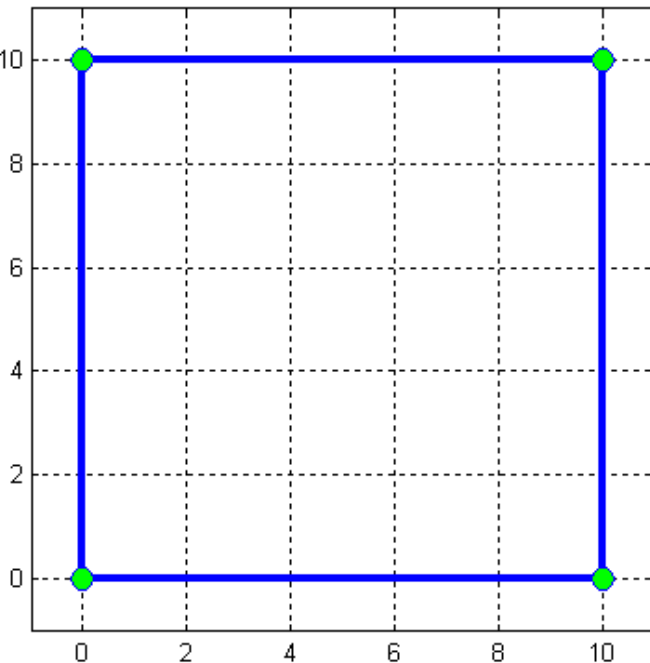




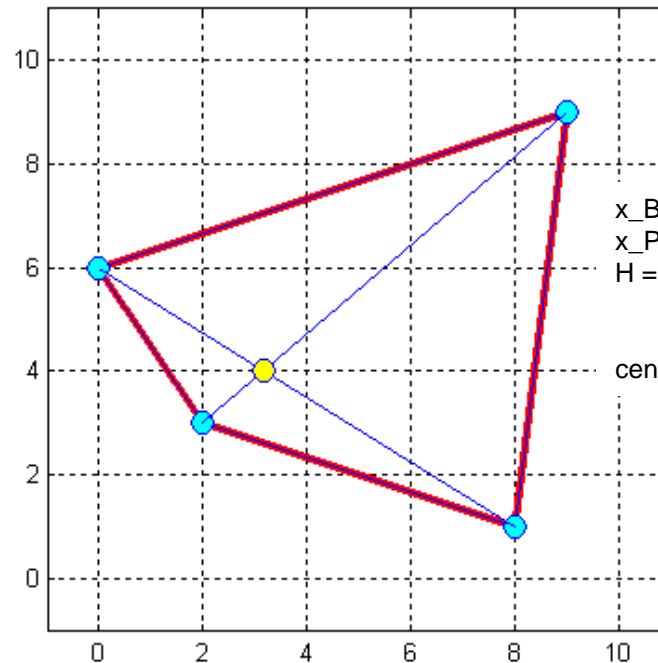
Opšti oblik morfološke transformacije, odnosno preslikavanje između PROJEKCIONE i BAZNE ravni definisan je relacijom:

$$[X_p] = [H][X_b] \longrightarrow k \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = [H] \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

BAZNA ravan



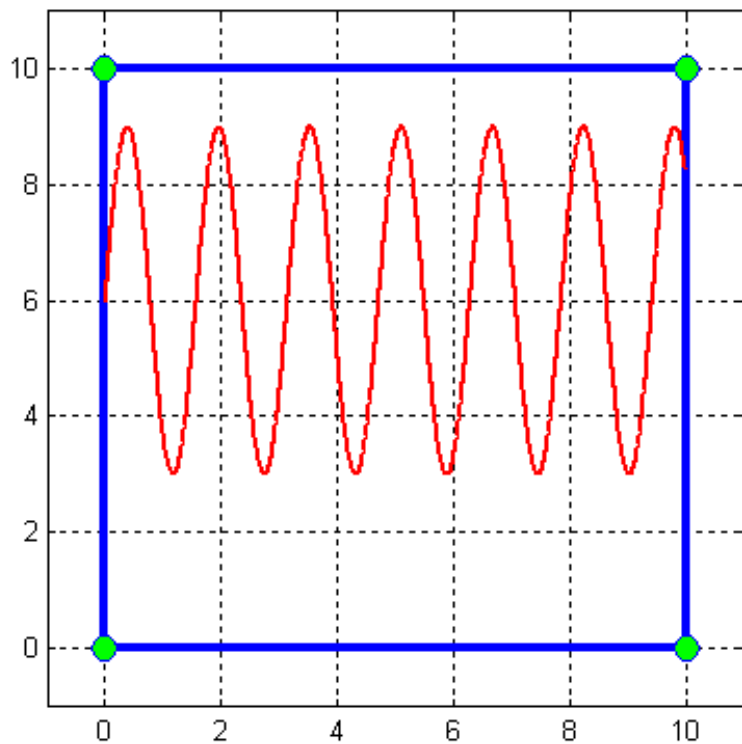
PROJEKCIONA ravan



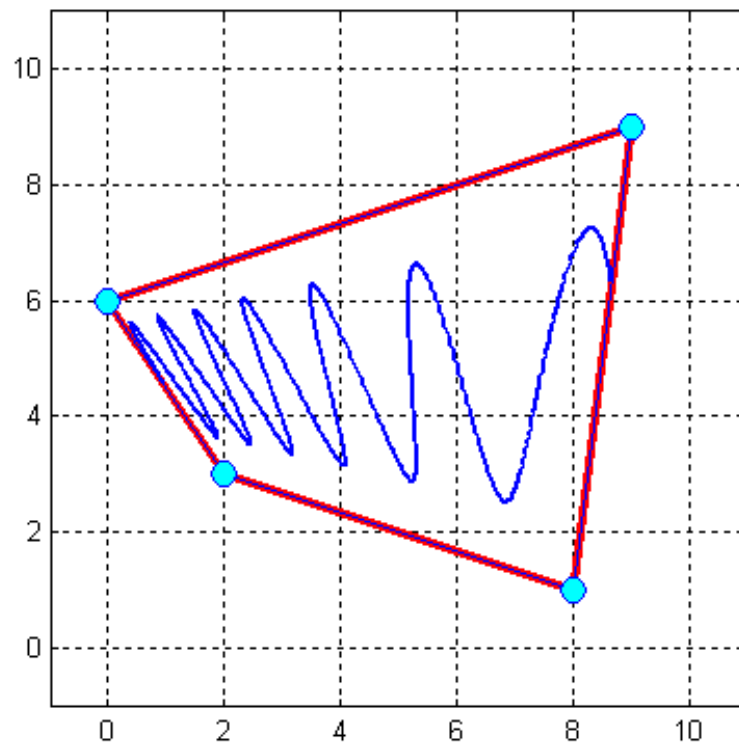
$x_B = [0 \ 0; 10 \ 0; 10 \ 10; 0 \ 10];$
 $x_P = [2 \ 3; 8 \ 1; 9 \ 9; 0 \ 6];$
 $H = [0.1826 \ -0.2000 \ 2.0000$
 $\quad -0.2522 \ 0.1348 \ 3.0000$
 $\quad -0.0522 \ -0.0275 \ 1.0000]$
 $centar_P = [3.1807; 4.0120; 1.0000]$

Jasno se uočava kako projektovani pravougaonik ima dva nedogleda koji formiraju dve naspramne stranice. Jedan nedogled se nalazi na levoj strani grafika a drugi je u njegovom dnu. Inverznom transformacijom se izobličeni prikaz objekta u projekcionoj ravni vraća u svoje originalno stanje kakvo postoji u baznoj ravni.

BAZNA ravan



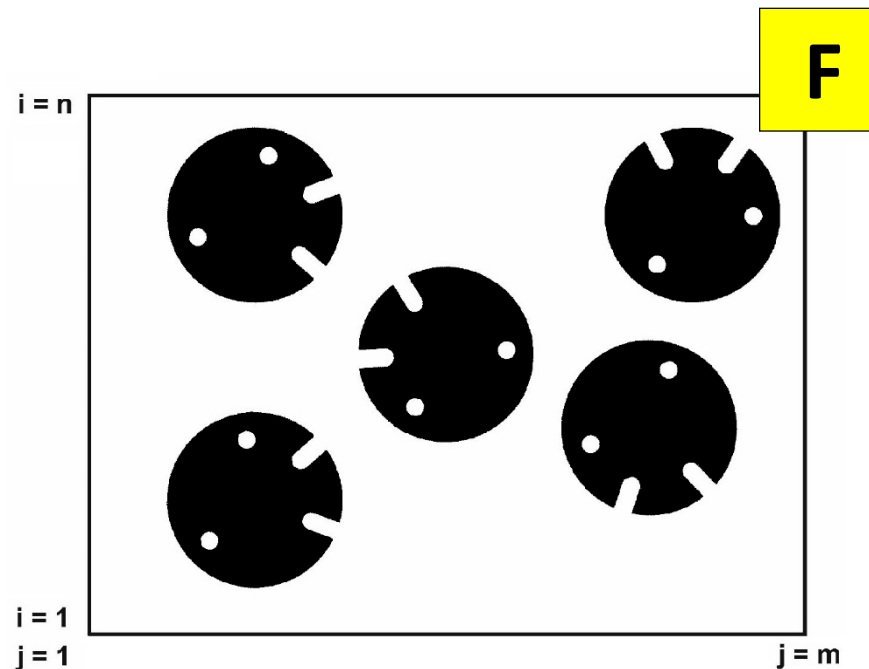
PROJEKCIONA ravan



SEMANTIČKA ANALIZA – SEGMENTACIJA slike

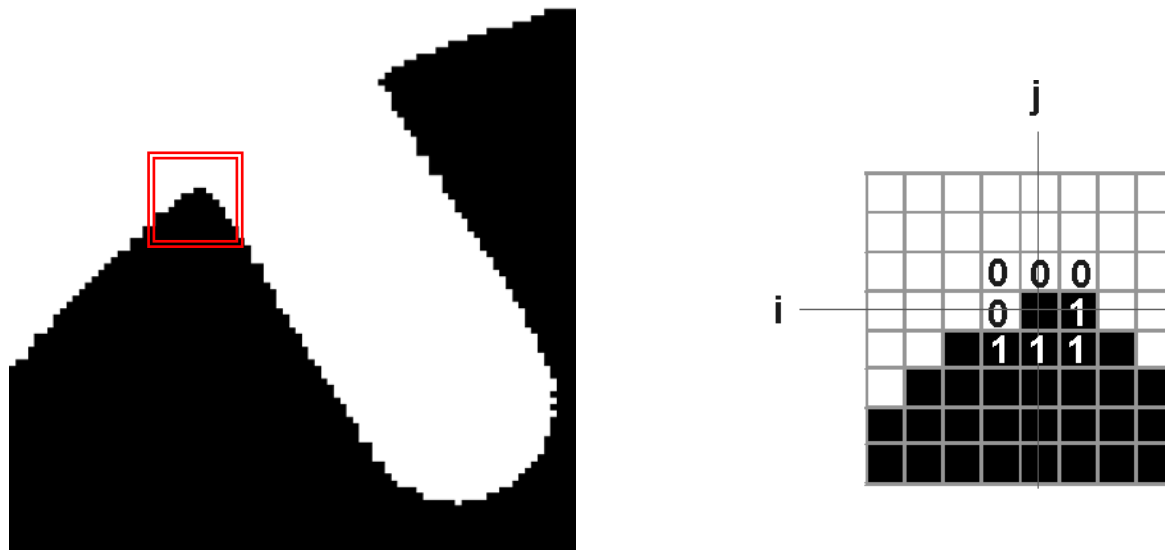
Identifikacija ivičnih tačaka i prepoznavanje objekata

Ova vrsta transformacije digitalne monohromatske slike započinje generisanjem binarne slike potrebnog kvaliteta koja je izražena binarnom matricom F .

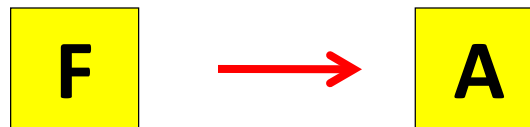


Zatim se vrši detekcija ivičnih piksela, odnosno onih piksela na kojima se dešava prelaz između nivoa osvetljenosti. Ova transformacija se izvodi primenom odgovarajućeg logičkog uslova:

Piksel koji pripada objektu ($f(i, j) = 1$) je konturni piksel, ukoliko u njegovom neposrednom okruženju postoji bar jedan piksel koji ne pripada objektu ($f(p, q) = 0$).

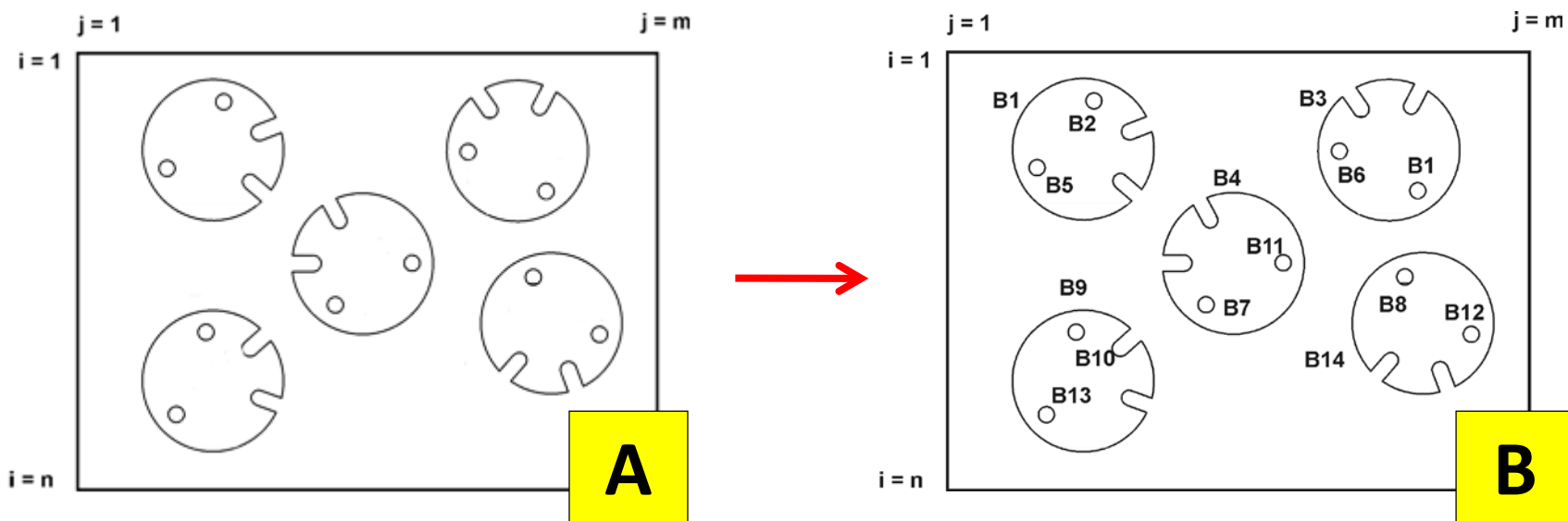


Rezultat ove transformacije je da se brišu svi neivični pikseli i tako se matrica F transformiše u matricu ivičnih piksela A .



Poznavanje ivičnih piksela ne znači istovremeno da poznajemo i konture. Kontura je uredjeni skup piksela. Ivični pikseli su neuredjeni skup. Uredjivanjem ivičnih piksela nastaje kontura. Identifikacija kontura vrši se primenom odgovarajućeg logičkog uslova:

Dva konturna piksela pripadaju istoj zatvorenoj konturi B_i , ukoliko su oni susedni.



Rezultat ove transformacije je da se ivičnim pikselima koje pripadaju jednoj konturi dodaje neka zajednička brojna vrednost, različita od brojne vrednosti koje se dodaju ivičnim pikselima koji pripadaju nekoj drugoj konturi. Tako se matrica ivičnih piksela A transformiše u matricu konturnih piksela B .

Poznavanje konturnih piksela ne znači u opštem slučaju da te konture pripadaju istom objektu. Prepoznavanje objekata znači da se konture koje pripadaju istom objektu grupišu u klaster koji je različit od klastera kontura koje pripadaju nekom drugom objektu. U opštem slučaju pretpostavljamo da se objekat sastoji iz jedne spoljašnje i više unutrašnjih kontura. Ova transformacija je složenija od prethodnih i izvodi primenom skupa logičkih relacija koje čine jedinstveni algoritam:

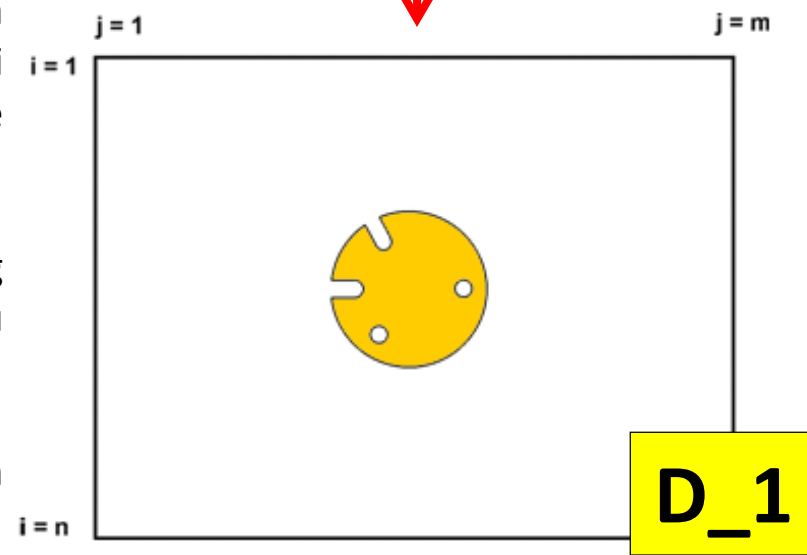
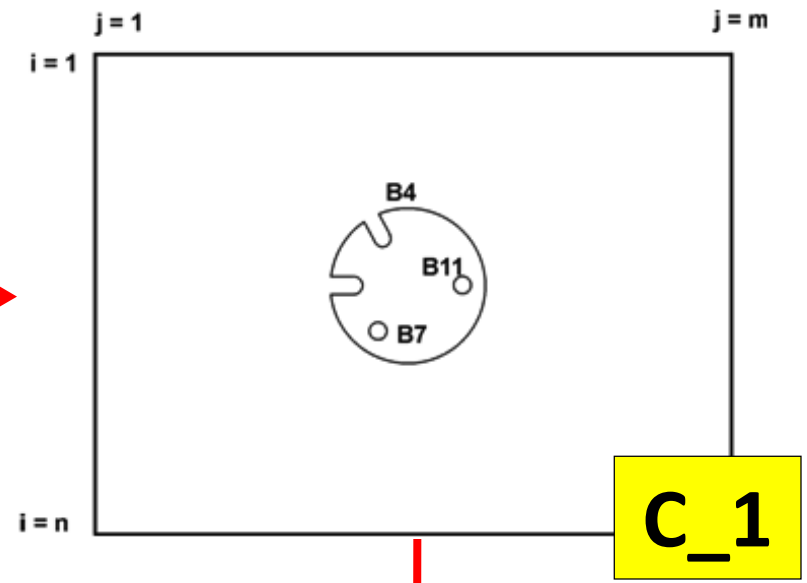
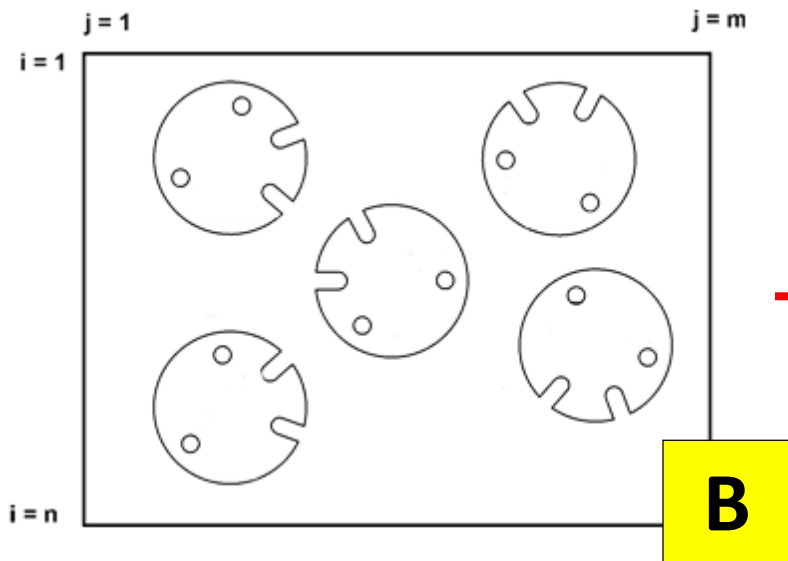
Iz skupa kontura koji je opisan matricom B , moguće je izdvojiti jednu spoljašnju i potreban broj unutrašnjih kontura koje pripadaju samo jednom objektu i u potpunosti ga opisuju.

Spoljašnje konture su uvek duže od unutrašnjih. Zato je dovoljno odrediti duzinu svih kontura sadržanih u matrici B i izdvojiti konturu sa najvećom dužinom (brojem elemenata). Najduža kontura je sigurno spoljašnja kontura nekog od objekata.

Dalje, da bi se utvrdili odnosi pojedinih kontura, potrebno je odrediti njihove centre / težišta.

Izračunavanjem distance centara pojedinih kontura u odnosu na centar izabrane spoljašnje konture, uzimajući u obzir njihove dužine, moguće je identifikovati koje od preostalih kontura pripadaju delu čija je spoljašnja kontura usvojena kao najduža.

Rezultat ove transformacije je da se uklanjaju sve konture koje ne pripadaju jednom istom objektu. Tako se matrica konturnih piksela B transformiše u matricu graničnih piksela objekta C . Logičkim operacijama se dalje mogu identifikovati svi pikseli koji su deo objekta i tako dobija matrica D .



Matrica B koja sadrži sve konture svih objekata na sceni transformiše se u matricu C_1 koja sadrži jednu spoljašnju i n_1 unutrašnjih konture koje pripadaju jednom objektu.

Matrica C_1 koja sadrži samo konture prvog identifikovanog objekta se dalje transformiše u matricu prvog objekta D_1.

Proces se dalje ponavlja do identifikacije svih objekata, odnosno formiranja matrice D_k.

Dalje se vrši identifikacija položaja objekta, odnosno **identifikacija pozicije** i **identifikacija orijentacije** objekta u radnom prostoru robota, **identifikacija kompletnosti** i drugih atributa/geometrijskih osobenosti objekta relevantnih za konkretan slučaj primene. Sve navedene informacije izvode se iz matrica D_i . Matrica D_i može da se sažme u jednu jedinstvenu matricu D , ekvivalentnu polaznoj matrici A , ali sa ugradjenim semantičkim odrednicama. Ovako redukovan skup informacija se prosledjuje nadređenom upravljačkom sistemu, konkretno sistemu upravljanja robota, koji dalje realizuje unapred definisan zadatak hvatanja i manipulacije.

Prethodno navedenim, izvode se grupa aktivnosti koje su obuhvaćene Fazom IV uvodjenja delova u proces: separacija, pozicioniranje i selekcija.

Sličan postupak, mada nešto složeniji, može se sprovesti i nad monohromatskom digitalnom slikom (Robertsov detektor ivica, Sobel detektor ivica, Canny detektor ivica, ...).

Pored prepoznavanja položaja, može se istovremeno ispitati kompletnost objekta ili proveriti neka od karakterističnih mera kao aktivnost koja pripada zadatku selekcije.

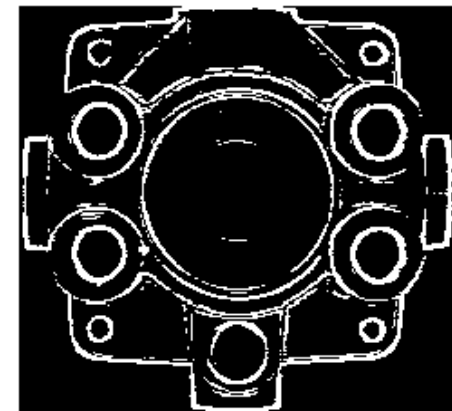
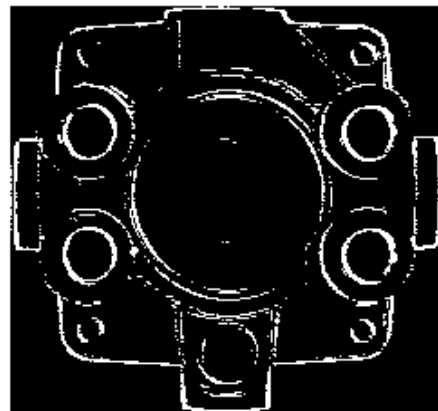


Ivične tačke detektovane:

Robertsovim

i

Sobelovim filtrom



b6: mems – mikroelektromehanički sistemi

MEMS

Mikroelektromehanički sistemi su tehnički sistemi čiji se sastavni delovi, odnosno komponente, kreću u intervalu gabaritnih mera od 1 do 100 μ m, a veličina sklopa se kreće u intervalu od 20 do 1000 μ m. Po pravilu se sastoje od jedne centralne jedinice, odnosno baznog dela u kojem se vrši odgovarajuća obrada informacija, i nekoliko mikrokomponenti koje ostvaruju međusobnu interakciju i/ili interakciju sa okruženjem.

Izradjuju se od silicijuma, polimera, metala i keramike. Tehnika izrade, odnosno mikrofabrikacija je bazirana na aditivnim principima, odnosno konceptu hemijske i fizičke depozicije materijala, i skidanju materijala hemijskim procesima (etching) i novije vreme, mikromehaničkom obradom. Takodje, izrada MEMS se zasniva i na tehnologiji litografije, odnosno izradom odgovarajućih oblika primenom foto ili sličnih postupaka i maski (maskom se štiti deo materijala čija se obrada ne želi da ostvari). U tehnološkom smislu, ovo je vrlo dinamična oblast.

MEMS Senzori: temperaturni, pritiska, kompasi/magnetometri, akcelerometri, žiroskopi, ... hibridi (kombinacija)

MEMS Opto-elektromehanički sistemi

MEMS Aktuatori

b7: digitalni interfejs i umrežavanje digitalnih računara