

DOLOČANJE MERILNE NEGOTOVOSTI MERILNEGA SISTEMA

1 NAMEN VAJE

Namen vaje je spoznati pomen merilne negotovosti merilnih sistemov na praktičnem primeru. Noben merilni sistem v praksi seveda ni absolutno točen. Za določitev točnostnega razreda določenega sistema pa potrebujemo ustrezen referenčni merilni sistem, ki ima vsaj za en razred boljšo točnost kot sistem, ki ga merimo.

Objekt preizkušanja bodo inkrementalni dajalniki za merjenje pomika, ki so osnova skoraj vsakega numerično krmiljenega stroja. Študentje se bodo seznanili z osnovami delovanja inkrementalnih dajalnikov pomika.

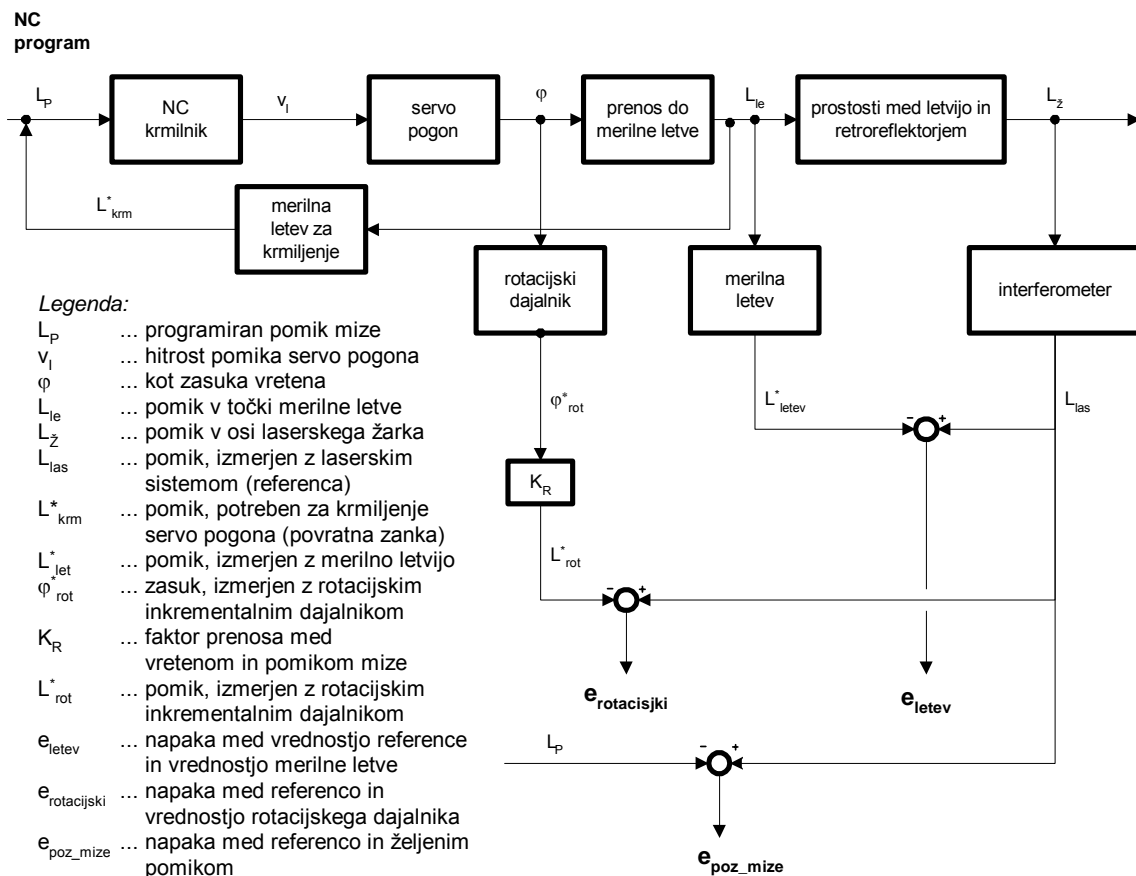
Na vaji bo za referenčni merilni sistem uporabljen laserski merilni sistem, ki se uporablja predvsem za merjenje geometrijske točnosti obdelovalnih strojev. V skladu s tem bodo študentje spoznali tudi osnove laserskega merilnega sistema.

2 CILJ VAJE

Na postavljenem testnem mestu eksperimentalno preverite točnost obeh inkrementalnih dajalnikov pomika glede na referenčni laserski merilni sistem. Dodatno ocenite še mehanske napake CNC pozicionirne mize sistema.

3 OPIS SISTEMA

3.1 POSTOPEK PREVERJANJA IN DOLOČITVE MERILNIH POGREŠKOV ROTACIJSKEGA DAJALNIKA IN MERILNE LETVE



Slika 3-1 Blokovni diagram preverjanja merilne letve in rotacijskega dajalnika z referenčnim laserskim merilnim sistemom

3.2 OPIS TESTNEGA MESTA

Slika 3-3 prikazuje testno mesto za preverjanje točnosti merilne letve. Na pozicionirno mizo je v eni osi montirana merilna letev. Miza z letvijo se premika, drsnik letve je fiksno pritrjen na podnožje pozicionirne mize. Miza je gnana s servo pogonom, ki je krmiljen preko osebnega računalnika. Mizo pri meritvi pomikamo le v osi merilne letve, ostale osi so fiksirane.

Referenčni merilni sistem je laserski merilni sistem. Sistem sestavljajo laserski izvor, interferometer, retroreflektor, fotosprejemnik, kompenzacijska enota in računska enota. Laserski izvor je pritrjen na podlago pozicionirne mize. Retroreflektor je pritrjen na pozicionirno mizo tako, da je smer žarka vzporedna s pomikom mize v X smeri. Retroreflektor je v vertikalni odmaknjen od drsnika merilne letve (zato je prisotna Abbejeva napaka).

Na vreteno, ki premika mizo, sta pritrjena servo pogon in rotacijski inkrementalni dajalnik zasuka.

3.3 PRIPRAVA SISTEMA ZA PREIZKUS TOČNOSTI

Pri postavljanju testnega mesta poskušamo minimizirati vse sistematične vzroke napak. Pri montaži inkrementalnih dajalnikov je potrebno:

- ☑ upoštevati pravila montaže, kot jih določa proizvajalec,
- ☑ izklopiti elektronsko korekcijo napak dajalnikov.

Pri montaži in uporabi referenčnega laserskega merilnega sistema je potrebno zagotoviti:

- ☑ poravnava ravnine interferometra in ravnine nihanja laserske svetlobe v območju $\pm 3^\circ$,
- ☑ soosnost žarkov do in od retroreflektorja, ki povzroči na celotni dolžini odklon manjši od 2 mm,
- ☑ minimiziranje kosinusne napake,
- ☑ minimiziranje Abbejeve napake,
- ☑ temperaturna stabilnost pozicionirne mize,
- ☑ kompenzacija razteznosti materiala in vplivov okolice z avtomatskim kompenzatorjem.

3.4 POSTOPEK PREVERJANJA

Točnost inkrementalnih dajalnikov se preverja z merjenjem več različnih položajev pozicionirne mize. Potrebno je opraviti določeno število meritev (položajev) na celotnem merilnem obsegu merilne letve. Miza se pomika v enakomernih programiranih pomikih. Zaradi histereznih napak izvajamo meritve pravilom večkrat v eni in drugi smeri pomika na celotnem obsegu. Po vsakem pomiku zapišemo vrednost, ki jo kaže merilna letva in referenčni merilni sistem.

Za grobo oceno točnosti merilne letve bomo na vaji izvedli poenostavljeno preverjanje na celotni dolžini. Po vsaki meritvi se v vsaki točki i meritve izračuna napaka e_{letev} . Napaka e_{letev} je razlika med vrednostjo L_{letev}^* , ki jo kaže merilna letva in referenčno vrednostjo L_{las} , ki jo kaže laserski merilni sistem po formuli:

$$e_{\text{letev}} = L_{\text{las}} - L_{\text{letev}}^*$$

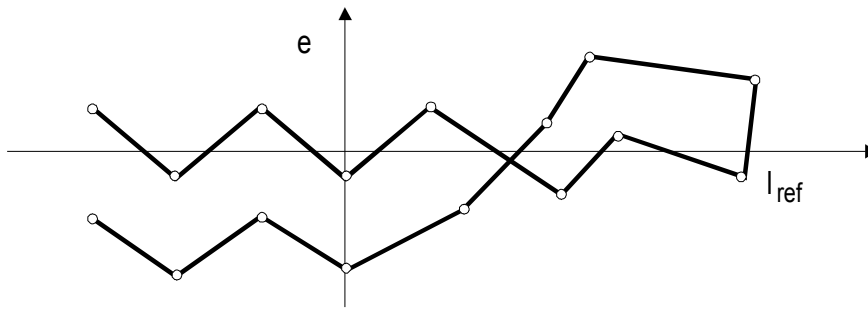
Napako $e_{\text{rotacijski}}$ med vrednostjo rotacijskega dajalnika L_{rot}^* in referenčno vrednostjo L_{las} , ki jo kaže laserski merilni sistem, izračunamo analogno:

$$e_{\text{rotacijski}} = L_{\text{las}} - L_{\text{rot}}^*$$

Napako $e_{\text{poz_miza}}$ med začetno programirano vrednostjo krmilnika L_p in referenčno vrednostjo L_{las} , ki jo kaže laserski merilni sistem, izračunamo pa:

$$e_{\text{poz_miza}} = L_{\text{las}} - L_p$$

Napake vnesemo v graf napak, ločeno za rotacijski in linearni dajalnik ter za pozicionirno mizo. Na absciso grafa nanašamo referenčno razdaljo, na ordinato pa obe napaki. Graf napak je osnova za določitev statičnih karakteristik.

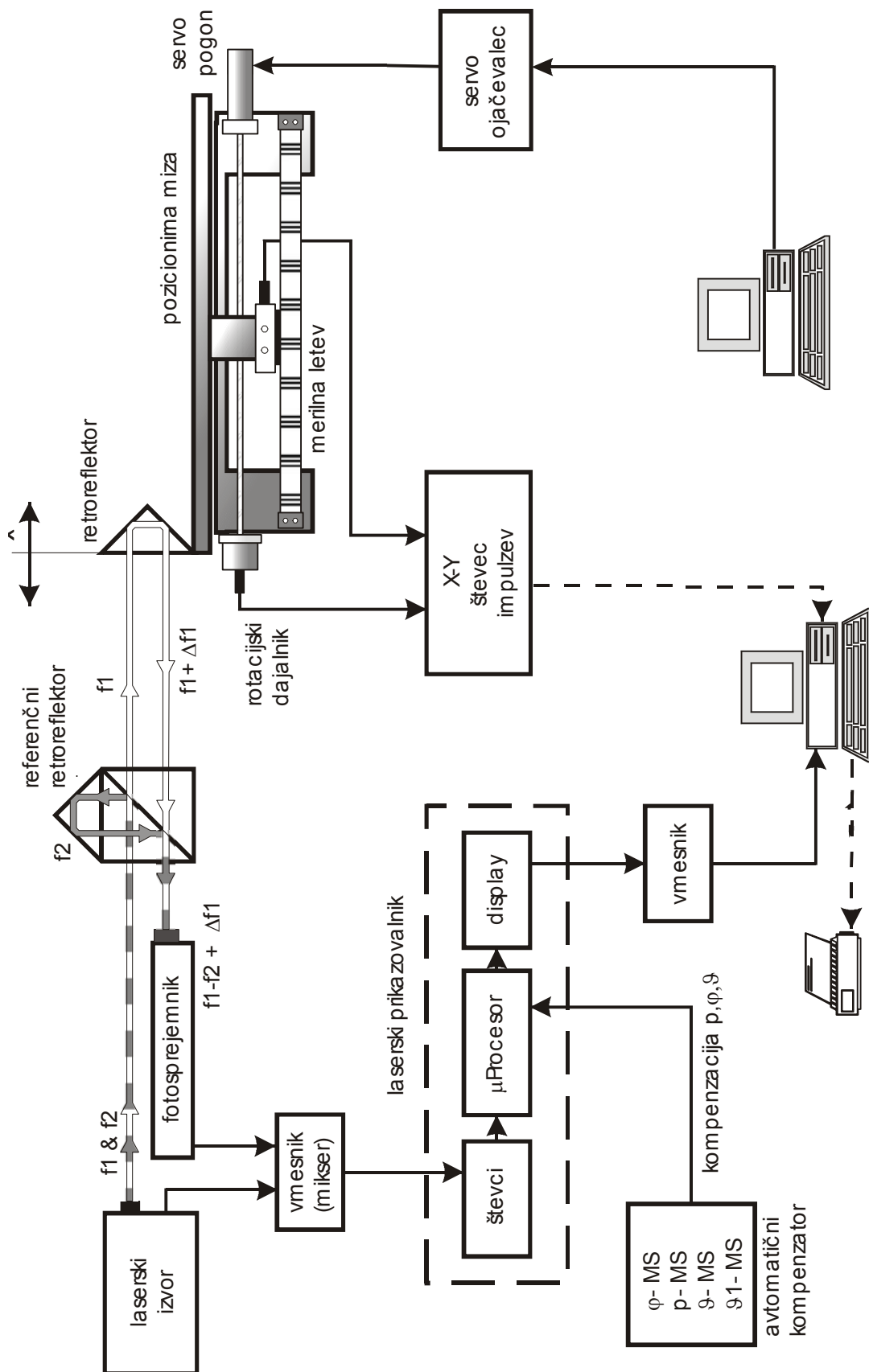


Slika 3-2 Primer grafa napak

Grafa napak lahko služi tudi za oceno, ali merilna letev zadovoljuje predpisani točnosti, ki jo opredeljuje proizvajalec. Poleg tega lahko ocenimo razred napak in vzroke napak, ki jih izmerimo med referenčno vrednostjo in rotacijskim dajalnikom.

Pred izvedbo preverjanja je potrebno določiti:

Maksimalen pomik mize		mm
Dolžino pomika med dvema točkama merjenja		mm
Merilno območje		mm
Število točk meritve		
Število pomikov		



Slika 3-3 Semioperacijska shema sistema za preverjanje točnosti merilne letve

4.2.1 Referenčni laserski merilni sistem

<i>Element</i>				
<i>Proizvajalec</i>				
<i>Tip</i>				
<i>Serijska številka</i>				
<i>Princip delovanja</i>				
<i>Ločljivost</i>				
<i>Območje merjenja</i>				
<i>Točnost...</i>				
<i>...pri pogojih</i>				

4.2.2 Pozicionirna miza

Miza	
<i>Proizvajalec</i>	
<i>Tip</i>	
<i>Serijska številka</i>	
<i>Pogon</i>	
<i>Območje pomika</i>	

4.2.3 Shema testnega mesta z opisom

4.3 PRIPRAVA SISTEMA

4.3.1 Upoštevanje vplivnih elementov na točnost preverjanj

- pravilnost montaže inkrementalnih dajalnikov
- poravnava ravnine interferometra in ravnine laserske svetlobe v $\pm 3^\circ$,
- soosnost žarkov, ki povzroči na celotni dolžini odklon manjši od 2 mm,
- minimiziranje kosinusne napake,
- minimiziranje Abbejeve napake,
- zagotoviti temperaturno stabilnost pozicionirne mize,
- kompenzacija razteznosti materiala in vplivov okolice (zraka) z avtomatskim kompenzatorjem.

4.3.2 Nastavitve parametrov preizkusa in okolice:

<i>Parametri okolice:</i>	
Temperatura zraka	
Zračni tlak	
Relativna vlažnost	
Temperatura merjenja	
<i>Konstante:</i>	
Razteznosti količnik merjenja	
Faktor kompenzacije materiala	
Faktor kompenzacije okolice	

<i>Parametri pri preizkusu:</i>	
Hitrost pomika	
Korak pomika	
Merilna dolžina	
Število točk	

5.2 VPRAŠANJA

1. Razložite točnost merilnega sistema!
2. Kako bi določili točnost merilnega sistema, ki ga proizvajate?
3. Kakšne so zahtevane karakteristike referenčnega merilnega sistema pri merjenju točnosti?
4. Razložite princip delovanja inkrementalnih dajalnikov pomikov!
5. Kako določamo smer pomika pri inkrementalnih dajalnikih?
6. Razložite delovanje laserskega merilnika razdalj!
7. Ali mora imeti kontrolni merilni sistem, s katerim preverjate točnost nekega merilnega sistema, boljšo ločljivost od merjenega? Obrazložite!
8. Kako bi se spremenila točnost linearnega dajalnika, če bi ga prerezali na pol in kako, če bi ga dvakrat podaljšali? Kako lahko teoretično poljubno podaljšate linearni dajalnik tako, da bo imel isto točnost kot osnovni?
9. Kako bi podali točnost rotacijskega merilnega dajalnika? Kako se spreminja točnost s številom obratov?
10. Zakaj se v računalniško vodenih strojih pogosteje kot rotacijski uporabljajo linearni dajalniki? Razložite!

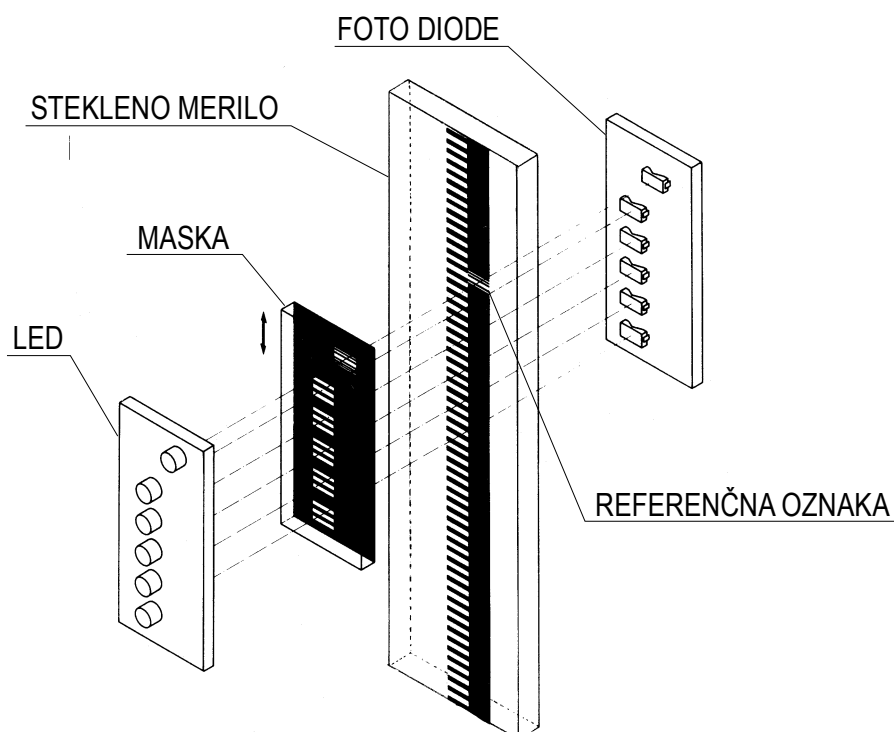
DODATEK – TEORETIČNE OSNOVE

6 OPIS MERILNIH SISTEMOV

6.1 INKREMENTALNI DAJALNIKI POMIKA

Inkrementalni dajalniki merijo pomike s štejetjem impulzov, ki jih na enakomernih razdaljah generirana na svetlobo občutljiv element.

V inkrementalnem dajalniku je stekleno merilo, na katerem si enakomerno sledijo prozorna in zatemnjena polja. Po merilu se pomika drsnik, na katerem je enak vzorec zatemnjenih in prozornih polj. Skupaj z drsnikom se pomikata na eni strani merila izvor svetlobe in na drugi strani svetlobni senzorji. Drsnik, izvor svetlobe in senzorji so toga povezni. Svetloba prehaja preko drsnika in merila do svetlobnih senzorjev.

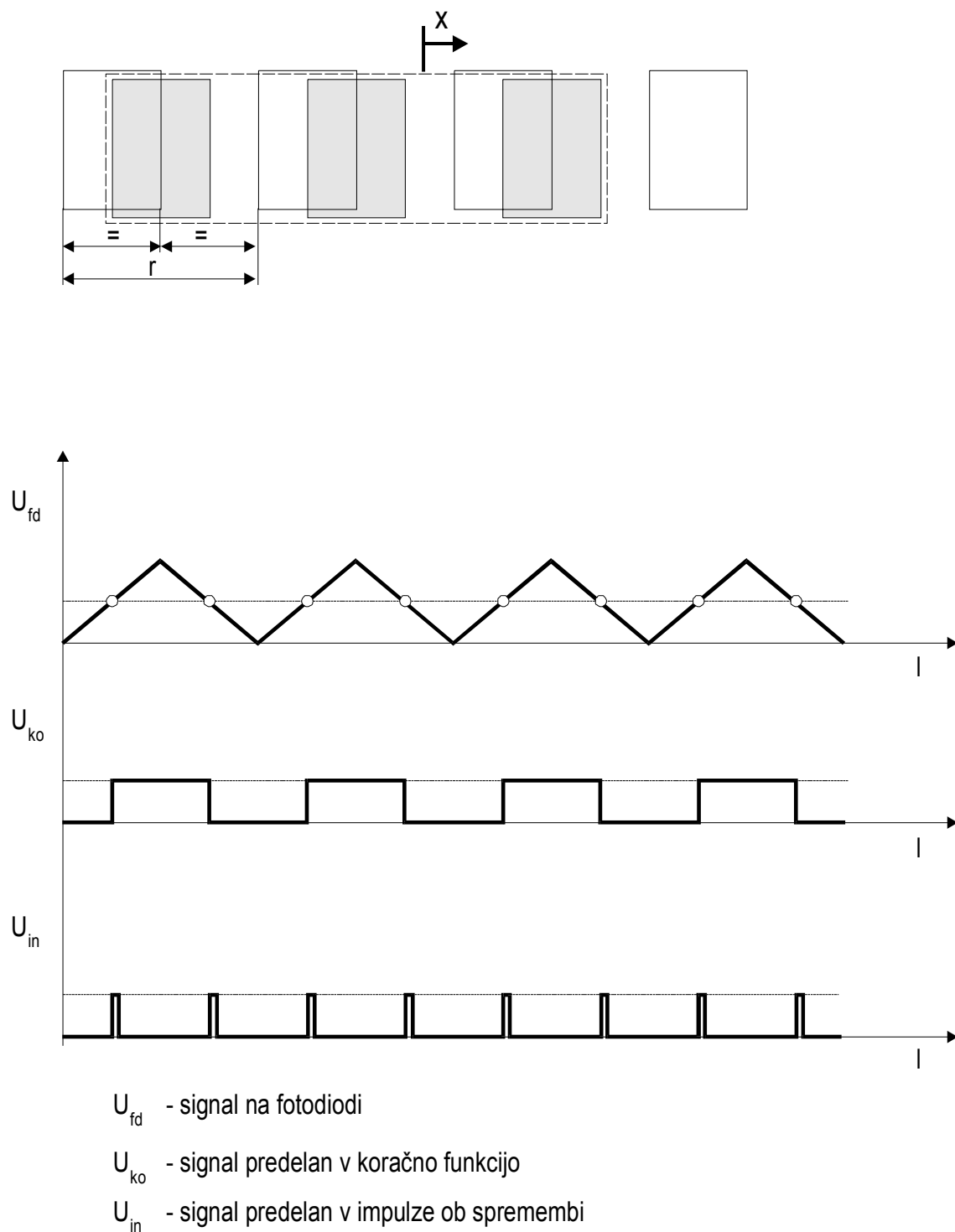


Slika 6-1 Zgradba linearnega inkrementalnega dajalnika

Razmik r med dvema poljema mehansko določa delitev (ločljivost) dajalnika. Tipično delitev je široka 0.002 ali 0.004 mm. Za poenostavitev razlage si predstavljajte, da svetlobni žarek prehaja samo skozi eno režo med zatemnjenimi polji drsnika. Kadar se zatemnjena polja drsnika in merila prekrivajo, ima žarek prosto pot skozi prozorno režo. Na svetlobni senzor (fotodioda) pada maksimalna možna količina svetlobe. Če se drsnik premakne tako, da se zatemnjena polja prekrivajo s prozornimi na merilu, je pot svetlobi zastrta. Svetlobni senzor in elektronika pretvorita signal med enim prehodom reže v kvazi sinusni signal s periodo enako širini reže..

Dobljen signal se ponavadi s pomočjo elektronike spremeni v koračno funkcijo, pri čemer lahko elektronika periodo sinusnega signala pretvori v eno ali več period koračnega signala. V števcu se

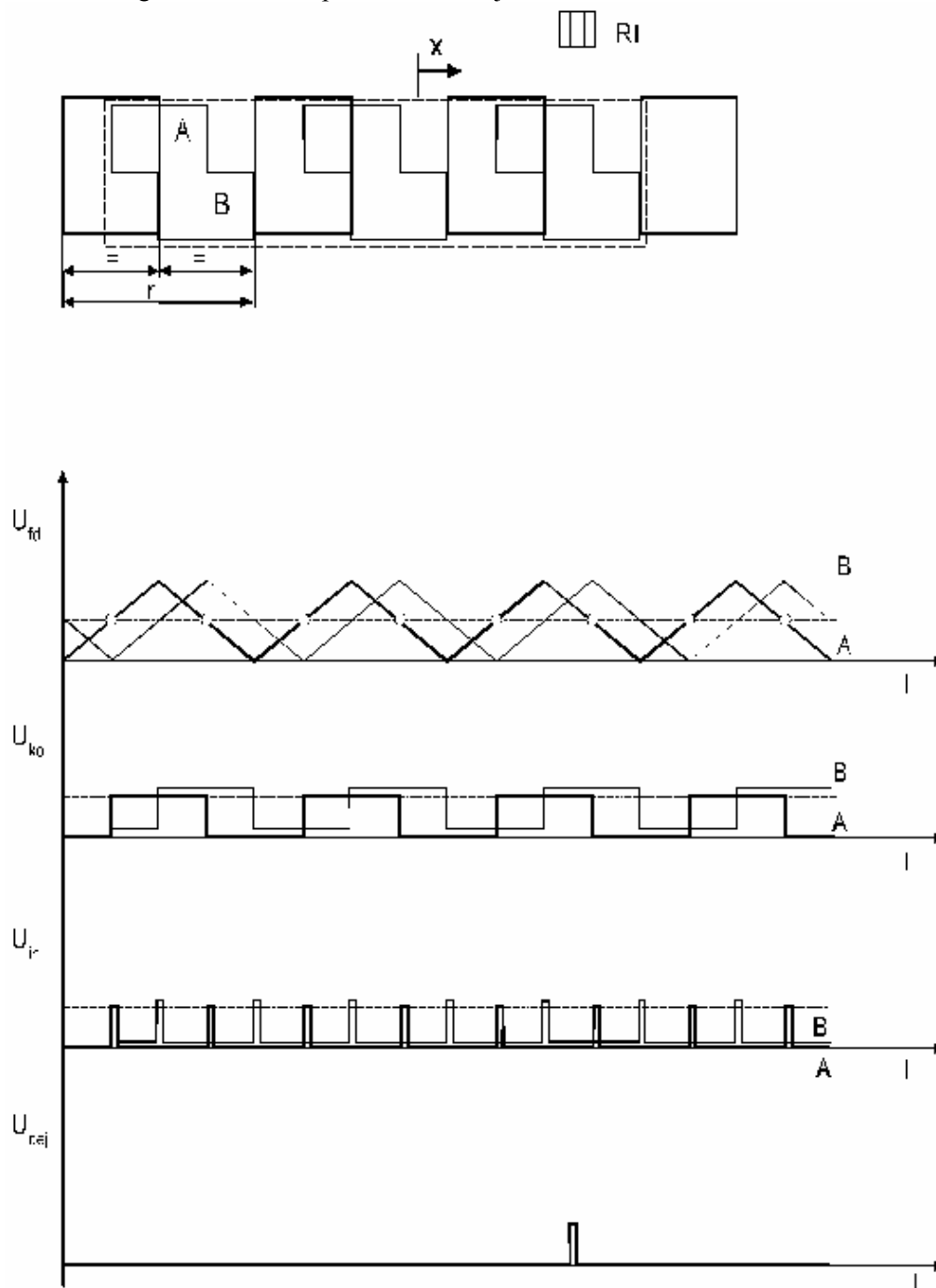
signal elektronsko obdelava tako, da se generira impulz ob vsaki spremembi koračnega signala. Impulzi se štejejo in so mere poti drsnika.



Slika 6-2 Osnovni in obdelani signali pri relativnem pomiku drsnika.

Z inkrementalni dajalniki se zaradi principa delovanja meri lahko le relativne pomike drsnika glede na merilo. Osnovna izvedba ne omogoča določanja smeri pomika, zato se uporablja le v rotacijski izvedbi za merjenje hitrosti in/ali pomikov na napravah, ki se vrtijo le v eno smer.

Smer pomika je možno določiti z dvojnimi drsnikom, pri čemer sta oba dela drsnika zamaknjena za $\frac{1}{4}$ reže. Izhodna signala, ponavadi označena z A in B, sta tedaj zamaknjena za $+\frac{1}{4}$ periode pri pomiku v eno smer in $-\frac{1}{4}$ pri pomiku v drugo smer. Zaostajanje signala A glede na B se da enostavno elektronsko zaznati, števec tako loči smeri pomika in enkrat prišteva drugič pa odšteva impulze. Zaradi za $\frac{1}{4}$ zamika signala se dvakrat poveča tudi ločljivost.

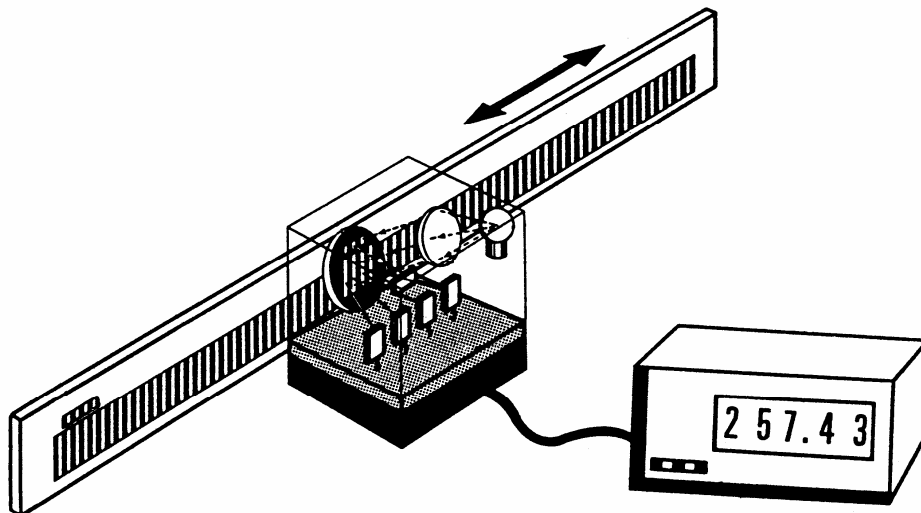


- U_{fd} - signal na fotiododi
- U_{ko} - signal, predelan v koračno funkcijo
- U_{ir} - signal, predelan v impulze ob spremembi
- $U_{r,ej}$ - referenčni signal

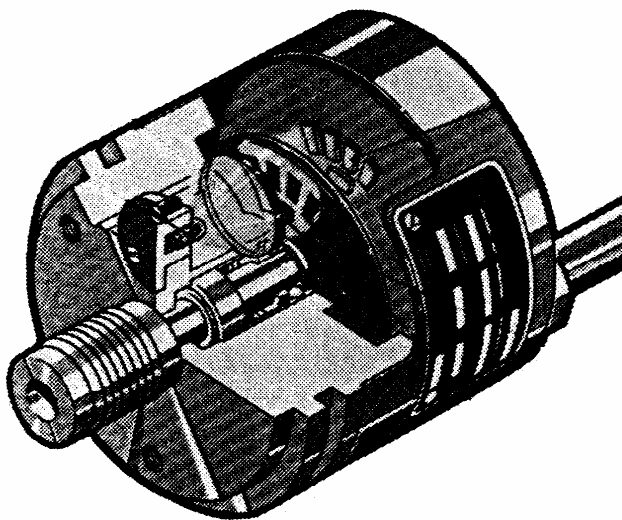
Slika 6-3 Določanje smeri pomika in referenčni impulz (A, B in RI signal).

Poleg tega je lahko na celotnem območju merila še oznaka, ki skupaj z ustrežno elektroniko generira impulz enkrat na celotnem območju merila. Referenčni signal, običajno označen z RI, omogoča ponovljivo določanje absolutne pozicije (glede na položaj merila) v točki, kjer se generira. Ponavadi se v pred uporabo inkrementalnega dajalnika poišče signal. V točki, kjer se generira, pa se inicializirajo števeci na neko znano vrednost. Postopku rečemo iskanje referenc merilnega sistema.

Uporabljamo linearne in rotacijske izvedbe inkrementalnih dajalnikov.



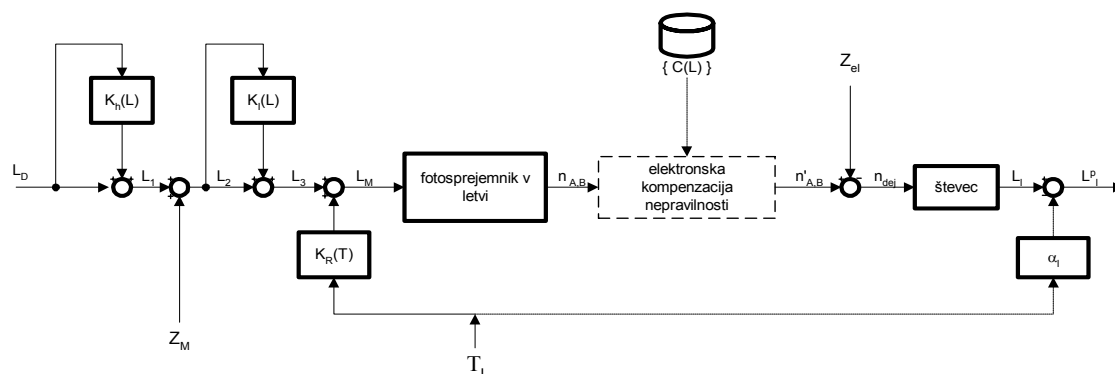
a) linearni inkrementalni dajalnik



b) rotacijski inkrementalni dajalnik

Slika 6-4 Izvedbe dajalnikov

Napake pri meritvah z inkrementalnimi dajalniki izvirajo iz mehanskih napak pri izdelavi, vplivov okolice meritve in mehanskih vzrokov pri montaži ali uporabi.



Legenda:

- L_D ... pomik drsnika v točki vpetja
- L_M ... pomik maske v točki žarka svetlobe
- L_I ... pozicija, ki jo kaže števec
- L_P ... pozicija po računsko korigiranem temperaturnem raztezku merila
- $n_{A,B}$... signal iz fotoprejemnika letve
- $n'_{A,B}$... elektronsko korigiran signal letve
- $\{C(L)\}$... baza elektronskih korektur za leteve
- $K_H(L)$... faktor histerze letve
- $K_I(L)$... faktor nepopolne izdelave letve
- $K_R(T)$... faktor realnega raztezka merila
- T_I ... temperatura merila
- α_i ... faktor teoretičnega raztezka merila
- Z_M ... mehanske motnje
- Z_{ei} ... elektronske motnje

Slika 6-5 Struktura izvora napak in način korekcije pri merilnih letvah

Neenakomerna porazdelitev zatemnjenih polj povzroči lokalna odstopanja od nominalne vrednosti in se kaže v lokalni nelinearnosti sistema. Ker je napaka ponovljiva, se jo da na sistemih z referenčnim impulzom delno odpraviti elektronsko, tako da v vsaki znani poziciji prištejemo izmerjeno napako.

Nepopolnost v signalih iz senzorjev in števecv se kaže v cikličnih napakah, znanih tudi pod imenom *napake razdelka*. Čeprav se ne napake seštevajo, so pomembne pri pomikih, ki so po velikosti blizu ločljivosti.

Napačna montaža linearnih inkrementalnih dajalnikov lahko povzroči nedovoljene raztezke v inkrementalnem dajalniku. Napaka se kaže v nelinearnostih na celotnem območju merjenja.

Napačna uporaba lahko povzroči napake, ki se pokažejo v veliki neponovljivosti sistema. Prevelika hitrost pomikanja lahko povzroči izgubljanje impulzov, preveliki pospeški in vibracije pa poleg motenj tudi poškodbo dajalnikov. Dovoljena hitrost je zaradi kapacitivnosti kablov (delujejo kot visokofrekvenčni filter) odvisna tudi od njihove dolžine in tipično ne presega 10 m/s.

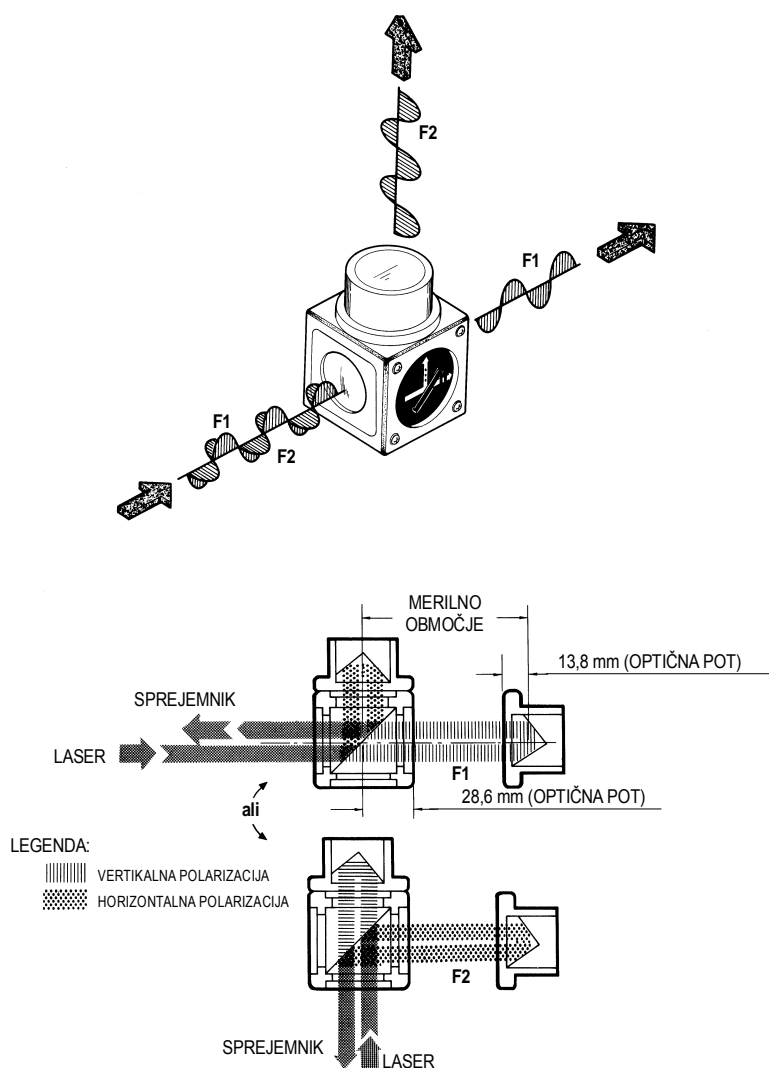
Dolžina merila povzroči linearno napako v sistemu zaradi temperaturnih raztezkov merila. Naklon linearne regresijske premice je enostavno izmerljiv in fizikalno določen, zato se ga da odpraviti z ustreznim koeficientom, če se meri temperatura okolice. Referenčna delovna temperatura inkrementalnih dajalnikov je običajno $20^{\pm 0.5}$ °C. Pri rotacijskih dajalnikih zaradi aksialnega raztezka temperatura nima vpliva.

Napaka zaradi histerze sistema je povezana s celotnim sistemom, na katerem je uporabljen inkrementalni dajalnik. Teoretična ponovljivost inkrementalnega dajalnika je sicer ± 0 pulza, vendar pa skupaj z mehanskim vpetjem, trenjem v prenosih in električnimi motnjami močno pade. Ponavadi ima način prenosa poleg temperaturne stabilnosti odločilno vlogo pri točnosti celotnega merilnega sistema.

Zaradi zahtevnosti izdelave se vsi inkrementalni dajalniki pred prodajo kalibrirajo. Glede na doseženo točnost so razdeljeni na razrede točnosti, tipično od $\pm 10 \mu\text{m/m}$ do $\pm 3 \mu\text{m/m}$ pri temperaturi 20°C .

6.2 LASERSKI MERILNI SISTEM

Laserski merilni sistem je sestavljen iz laserskega izvora, interferometra, retroreflektorja in optičnega senzorja (Slika 6-6). Laserski žarek je sestavljen iz dveh komponent. Ena je polarizirana vertikalno glede na izvor, druga pa horizontalno. Tako sestavljen žarek potuje v interferometer. V interferometru se žarek razdeli v komponenti, ena se preko optičnih zrcal odbije proti senzorju, druga pa neovirano nadaljuje pot. Ta del nadaljuje pot proti retroreflektorju v katerem se odbije in vrne nazaj v interferometer v isti osi, kot je odbita prva komponenta. Relativno spreminjanje razdalje med retroreflektorjem in interferometrom povzroči interferenčne pojave v točki združitve.



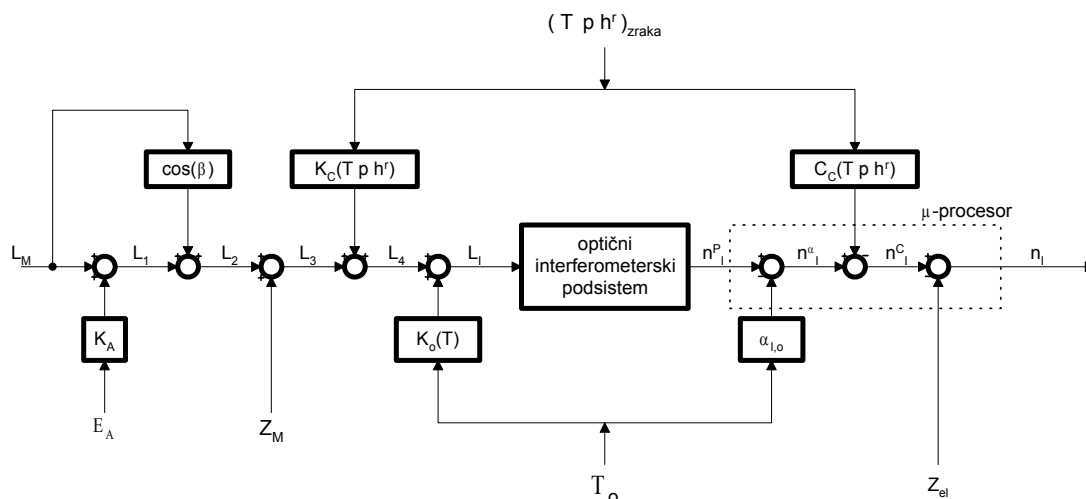
Slika 6-6 Princip delovanja laserskega merilnega sistema

Zaradi dvojne poti odbitega žarka se maksimalna interferenca pojavi pri vsakem pomiku, ki ustreza četrtini valovne dolžine laserskega izvora. Preko optičnega senzorja in elektronike računalnik šteje spremembe jakosti svetlobnega signala, ki so posledica različne interference, in tako tudi relativne

pomike med interferometrom in retroreflektorjem. Smer pomika določi računalnik na osnovi Dopplerjevega efekta, se pravi spremembe frekvence vpadle svetlobe.

Tipično daje laserski izvor svetlobo v rdečem delu vidnega spektra z valovno dolžino okoli 600 nm, ločljivost sistema je vedno $\lambda/4$.

Možnih vzrokov za napako merilnega sistema je več.



Legenda:

- L_M ... pomik maske merilne letve v točki merjenja
- E_A ... odmik osi žarka od maske
- K_A ... faktor Abbejeve napake
- β ... kot nesoosnosti žarka svetlobe in smeri pomika
- $T p h^r$... temperatura, pritisk in relativna vlažnost zraka
- $K_C(T p h^r)$... realni faktor spremembe hitrosti svetlobe
- $C_C(T p h^r)$... tabelarično ali avtomatsko določeni faktor spremembe hitrosti svetlobe
- T_O ... temperatura merjenega objekta
- $K_O(T)$... realni linearni temperaturni faktor raztezka objekta
- $\alpha_{I,O}$... teoretični faktor linearnega temperaturnega raztezka objekta
- L_I ... pomik v točki interference
- n^P_I ... signal štetih interferenc
- n^a_I ... signal po računski korekciji temperaturnega raztezka materiala
- n^C_I ... signal po računski korekciji spremembe hitrosti svetlobe
- n_I ... pozicija, prikazana na zaslonu laserskega sistema
- Z_M ... mehanske motnje
- Z_{el} ... elektronske motnje

Slika 6-7 Struktura izvora napak in način korekcije pri laserskem merilnem sistemu

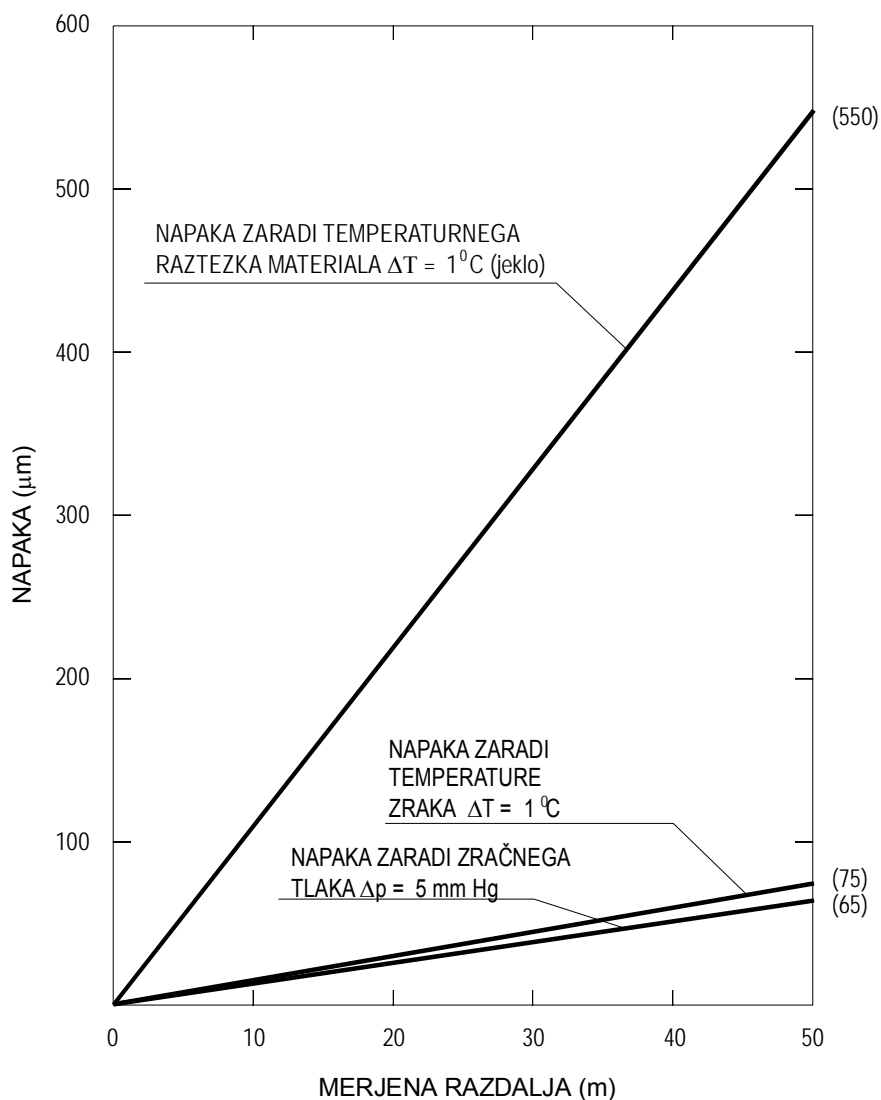
Poravnava interferometra in izvora je pomembna zaradi principa delovanja interferometra. Ena od komponent laserske svetlobe mora vstopati v interferometer v isti ravnini, kot je osnovna ravnina za montažo interferometra. Dovoljeno odstopanje je $\pm 3^\circ$. Pri zamiku ravnin za 45° na senzor ne pride koristen signal.

Soosnost žarkov vpliva na količino vpadle svetlobe v senzor. Za pravilno delovanje moramo na celotnem merilnem območju doseči soosnost žarkov, ki na senzorju ne povzroči odmika ene komponente za več kot 2.5 mm.

Hitrost svetlobe pomembno vpliva na točnost merilnega sistema. Hitrost svetlobe se v zraku spreminja v odvisnosti od temperature, tlaka in vlažnosti zraka. Pri merjenju z laserskim merilnim sistemom moramo *nujno* poznati te parametre okolice in jih upoštevati. Laserski merilni sistemi imajo ponavadi

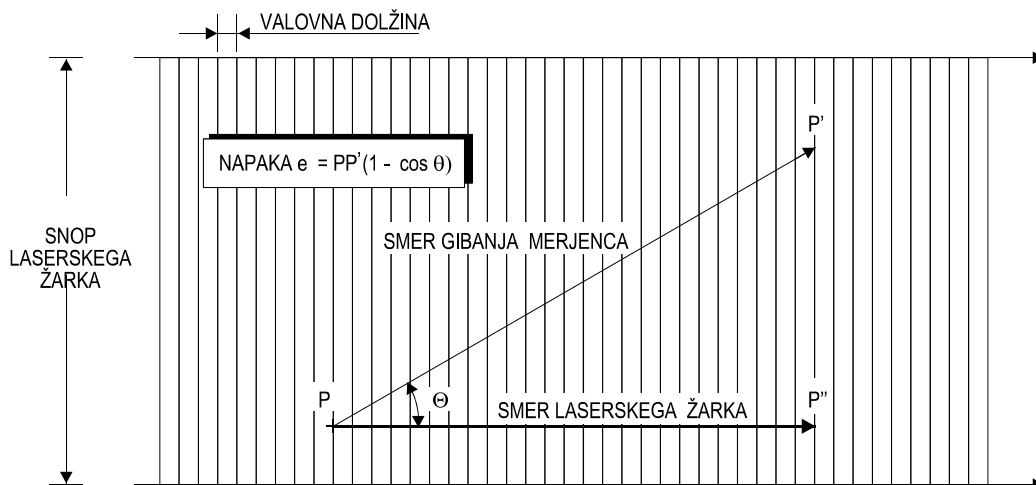
dodane senzorje za temperaturo, tlak in vlažnost zraka in spremembo hitrosti svetlobe avtomatično kompenzirajo.

Temperatura materiala prispeva največjo napako v meritvi. Sprememba dolžin zaradi temperaturnih raztezkov merjenca je bistveno večja od ločljivosti laserskega merilnega sistema. Napaka je fizikalno določena in se jo da izračunati, če so poznani temperatura naprave, velikost naprave in toplotni koeficient razteзка materiala, iz katerega je merjenec, ter če je temperatura stabilna. Zaradi termičnih raztezkov morajo biti vsi deli laserske naprave pritrjeni ali na merjenec (delovni stroj) ali podlago iz istega materiala, kot je merjenec.



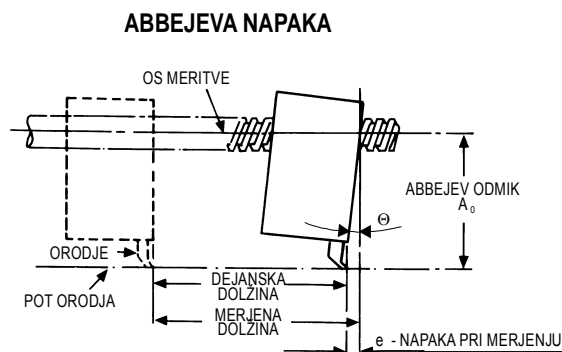
Slika 6-8 Vplivi modifikacijskih inputov na laserski merilni sistem

Nesoosnost poti merjenca in laserskega žarka povzroči napako kosinusa. Laserski sistem meri projekcijo poti merjenca v os laserskega žarka. Napaka je fizikalno (geometrijsko) določljiva.



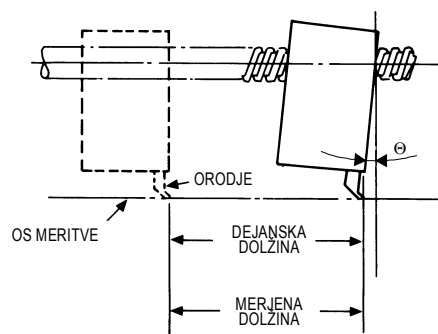
Slika 6-9 Napaka kosinusa

Prostosti v mehanskem prenosu v sistemu ponavadi prinesejo najbolj pomemben del napak pri merjenju z laserskim merilnim sistemom. Za čim boljše odpravo mehanskih prostosti moramo upoštevati Abbejev princip.



$$e = A_0(\sin \theta)^2 \text{ - za majhne kote}$$

a)



b)

Slika 6-10 Abbejeva napaka

Os merilnega žarka mora biti čim bližje tistemu delu, katerega pomike merimo. Ker ponavadi ni možno postaviti retroreflektorja točno v točko, katere pot merimo, ga odmaknemo v tisti osi, kjer pričakujemo najmanjšo Abbejevo napako.