

# LASERSKI MERILNIK DEBELINE S STATISTIČNO OBDELAVO MERILNIH REZULTATOV

Darjan Gradišnik, Dali Donlagić

**KLJUČNE BESEDE:** merilnik debeline, valjanje, vlečenje, stiskanje, kovanje, merilniki laserski, laserji polprevodniški, merjenje stično, merjenje brezstično, podatki dinamični, napake meritev, profili vzdolžni, avtokorelacija, histogrami, senzori triangularni

**POVZETEK:** Meritev debeline je postopek, ki ga srečujemo v vseh panogah industrije. Kvaliteten merilnik je nujen pri kontroli in regulaciji valjanja, vlečenja, stiskanja, kovanja itd. raznih materialov.

V avtomatski regulaciji debeline (AGC) nas zanimajo zvezne meritve, ki pa so lahko stične ali brezstične. Zaradi doseganja večjih pretokov materiala se vse bolj uveljavljajo brezstične meritve, pri katerih tudi ne prihaja do poškodb na merilnem mestu. V ta razred sodi tudi laserski merilnik debeline, ki ima pred ostalimi tudi to prednost, da je merjenje debeline njegova primarna funkcija, medtem ko ostali podobni merilniki merijo debelino posredno prek drugih fizikalnih veličin.

## Laser Thickness Measurer with Statistical Processing of Measurement

**KEY WORDS:** thickness measurers, rolling, extrusion, pressing, forging, laser measurers, solid-state lasers, contact measurement, non-contact measurement, dynamical data, measurement errors, longitudinal profiles, autocorrelation, histograms, triangular sensors

**EXTENDED ABSTRACT:** Thickness measurements are frequent in all branches of industry. A quality measurer is indispensable for process control of rolling, drawing, extrusion, pressing, forging, ... of different materials.

In Automatic Gauge Control continuous measurements are very practical. They are divided into two groups: contact and noncontact measurements. In order to attain a greater materials flow, non-contact measurements are more suitable, particularly because no damage is made on the measured region.

Laser thickness measurers are grouped into this class. Their advantage results come from the fact that the measurement of distances is their basic function, whereas other types measure the thickness indirectly from other physical magnitudes.

In the first chapter a short overview of other thickness measurements is made.

We can break semiconductor properties into two broad categories: electronic and optical. Band gap is the most important parameter of optical properties. In some semiconductors the recombination energy is released as heat, in other much of the recombination energy is released as light. The light output current is very inefficient below the threshold and becomes more efficient above it.

The laser diode is a part of triangular sensor which consist also of a PSD (Position Sensitive Device) and two lens systems. Two sensors can be used for two - sided thickness inspection, one above and one below the web. The output from both sensors subtracted from the fixed distance between sensors is proportional to the material's thickness. This procedure removes the variables caused by vibration, bounce or tension of running web.

We used an industrial PC with added opto isolation and relay output units instead of a PLC or a math unit.

Several dynamic data are available in the main display: thickness, thickness error, alarms, messages, profile, histogram and (or) auto correlation. After 30 samplings either auto correlation or a histogram is done. Analysing with auto correlation is very effective if some included frequencies from the plant are transferred to material's surface or in case when the control loop becomes unstable. The histogram offers a simple pattern recognition for the operator (if the thickness or the shape are inside limits).

Further research with several measurement places and an interpolation curve between them will be conducted for 3D surface analysis of the material.

### 1. Merjenje debeline

Kratko bomo pregledali različne metode merjenja razdalje, oz. debeline. Ponavadi z enim merilnikom merimo razdaljo, z dvema diametralno nameščenima pa debelino.

**Potenciometrski dajalniki** nam dajo podatek o razdalji kot funkcijo priključne napetosti ( $d = f(U)$ ). Problem je pogrešek meritve ( $> 1\%$ ).

**Pneumatski dajalniki** delajo na principu šoba - odbojna ploščica, kjer ploščico predstavlja kar merjenec, ali pa je prek valjčnic ploščica povezana z merjencem. Za te dajalnike je značilno majhno linearno območje, ki ga nekoliko povečamo z uporabo dveh sistemov, primerjalnega in merilnega.

**Kapacitivni dajalniki** so ponavadi različne izpeljanke ploščatega kondenzatorja. Iz enačbe:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S (N - 1)}{d} \quad (1.1)$$

$C$  - kapacitivnost  
 $\epsilon$  - dielektrična konstanta  
 $N$  - število plošč kondenzatorja  
 $d$  - razdalja med ploščami

kot merilno spremenljivko uporabimo razdaljo med ploščami  $d$ . Ena od plošč je kar merjenec. Slabe strani metode so občutljivost na motnje iz okolice pa tudi nelinearna odvisnost kapacitivnosti od razdalje ( $C = f(1/d)$ ).

**Induktivni dajalniki** kot merilniki razdalje se največ uporabljajo v izvedbi linearnega diferencialnega transformatorja (LVDT). Pri tem v enačbi za induktivnost:

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (1.2)$$

$L$  - induktivnost ravne tuljave  
 $\mu$  - magnetna permeabilnost  
 $S$  - presek tuljave  
 $l$  - dolžina tuljave

ponavadi spreminjamo permeabilnost s premikanjem položaja jedra. Ker je jedro prek ročice povezano z merilnimi valjčnicami, je tak način meritve stičen.

**Infra svetlobni** merilniki temeljijo na resonančni absorpciji žarkov v atomih, oz. molekulah merjenca. Valovna dolžina svetlobe mora ustrezati kemijski konstituciji merjenca, jakost absorpcije dovedene energije pa je odvisna od gostote merjenca. Če je ta konstantna lahko prek relacije:

$$d = \frac{m}{S\sigma} \quad (1.3)$$

$d$  - debelina materiala  
 $m$  - masa materiala  
 $S$  - površina merjenja  
 $\sigma$  - gostota materiala

dobimo z umerjanjem debelino materiala direktno. Obstajata dve metodi: z odbojem in presvetlitvijo materiala.

**Meritve debelin z Röntgenskimi,  $\alpha$ ,  $\beta$  in  $\gamma$  žarki** prav tako temeljijo na absorpciji žarkov v materialu, ki je odvisna od gostote materiala. Ponavadi je sprejemnik ionizacijska komora, v kateri pri konstantni priključeni enosmerni napetosti, temperaturi in tlaku halogenega plina pride pod vplivom kratkovalovnega valovanja do ionizacije molekul plina in zato steče ionizacijski tok. Ta je odvisen od števila ionskih parov, število teh pa od števila radioaktivnih delcev, ki so prišli iz radioaktivnega izvora (Röntgenske cevi) skozi material do komore:

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-kd} \quad (1.4)$$

$I(d)$  - intenzivnost sevanja  
 $I_0$  - intenzivnost sevanja brez merjenca  
 $k$  - koeficient absorpcije materiala (merjenca)  
 $d$  - debelina materiala

Ta tok je velikosti  $10^{-10}$  do  $10^{-8}$  A in ga na visokoohmskem uporu pretvorimo v napetostni signal.

Kljub potrebni zagotovitvi varnosti pri upravljanju z izotopi in zavarovanju merilnega prostora ter obvezni linearizaciji merilne krivulje, se ta merilni postopek med brezstičnimi največ uporablja.

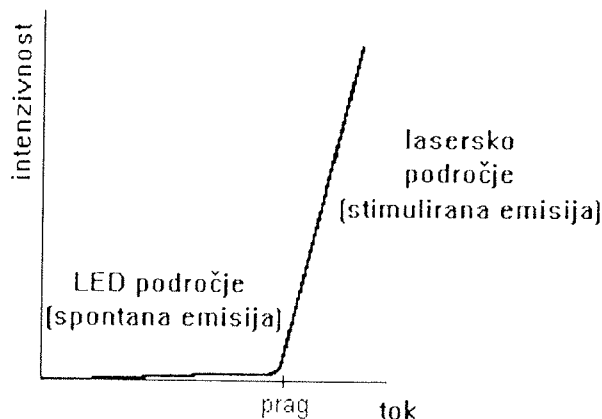
## 2. Polprevodniški laser, triangularni senzor

Lastnosti polprevodnikov lahko razdelimo v dve področji: elektronsko in optično. Elektronske lastnosti vključujejo koncentracijo prostih nosilcev, prevodnost in gibljivost elektronov, za optične pa je zelo pomemben zaporni pas, oz. njegova energijska širina, ki določa tudi valovno dolžino valovanja, ki ima dovolj energije za prestop med valenčnim in prevodnim pasom in obratno:

$$E_{\text{zap.pas}} = \frac{1240}{\lambda_{\text{zap.pas}}} \quad (2.1)$$

$E$  - energijska širina zapornega pasu (eV)  
 $\lambda$  - minimalna valovna dolžina (nm)

Na PN spoju prihaja do rekombinacij in rekombinacijska energija se lahko sprošča kot toplota (pri Si), ali pa kot svetloba (GaAs). Pri LED imamo spontano emisijo, ki seva v vse smeri v širšem pasu, pri laserski diodi pa je emisija v smeri polprevodniške plasti in določene valovne dolžine. Do t.i. laserskega praga tudi laserska

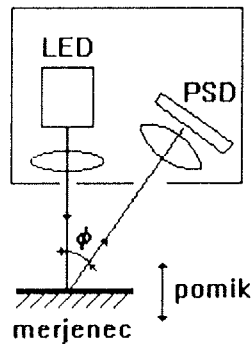


Slika 2.1: Intenzivnost svetlobnega sevanja pod in nad pragom laserskega delovanja

dioda dela v področju spontane emisije, kar vidimo na sliki 2.1:

To je seveda zelo poenostavljen opis delovanja. Laserska dioda je sestavni del laserskega senzorja razdalje, ki ga sestavljajo še PSD (Position Sensitive Device) in

sistem leč. Ker izvor svetlobe, merjenec in PSD tvorijo trikotnik, kjer se v odvisnosti od oddaljenosti merjenca



Slika 2.2: Namestitev izvora in ponora v senzorju razdalje

kot odboja spreminja, se ta razpored imenuje tudi trikotni (slika 2.2):

Funkcija odvisnosti razdalje od merjenca in kota odboja je nelinearna:

$$\text{razdalja} = \sqrt{\frac{l^2}{2 \cdot (1 - \cos(\varphi))}}$$

$l$  - razdalja med izvorom in ponorom žarka  
 $\varphi$  - kot odboja žarka od merjenca

Izhodni signal je nato lineariziran in ponavadi dobimo na izhodu tokovni signal. Območje 4 - 20 mA pomeni tudi merilni obseg razdalje, tako da je  $\text{razdalja} = f(I_{\text{izh}})$ .

### 3. Zasnova merilnika

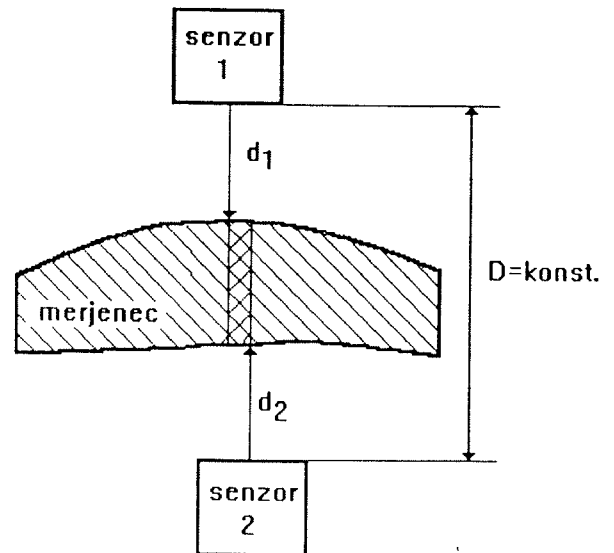
Dva, na nasprotnih straneh merjenca nameščena senzorja razdalje sestavljata merilno glavo. Princip je enostaven: če poznamo razdaljo med senzorjema, potem se debelina izračuna kot:

$$\text{debelina} = D - d_1 - d_2 \tag{3.1}$$

$D$  - razdalja med senzorjema  
 $d_i$  - oddaljenost objekta od  $i$  - tega sensorja

Ker obravnavamo dinamično merjenje, kar pomeni, da se merilni objekt giblje mimo merilne glave, pride do merilnega pogreška zaradi časovnega zamika  $\Delta t$  med odčitkom prve in druge razdalje (slika 3.1). Vpliv tega pogreška pa je majhen, če je tipalni čas ustrezno izbran glede na pričakovano dinamiko spremembe debeline merjenega objekta.

Klasična zasnova merilnika je taka, da ima vsak senzor mikro kontroler, ki daje analogni signal razdalje, oba pa sta priključena še na matematično enoto (kontroler), ki daje na izhodu vsoto, oz. razliko vhodnih signalov, ki jo potem uporabimo v regulacijski zanki. Če hočemo opravljati še statistične izračune, je potrebno signal prek

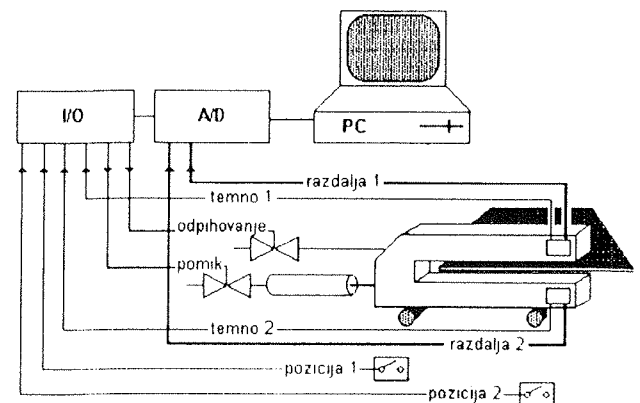


Slika 3.1: Princip merjenja debeline z dvema diametralno nameščenima senzorjema

serijskih kanalov ali pa prek A/D pretvorbe peljati na nadzorni računalnik.

Odločili smo se, da namesto mikrokontrolerjev uporabimo kar PC računalnik industrijske izvedbe, saj novejši procesorji (Intel 80386, ...486) omogočajo dovolj hitre obdelave merilnih rezultatov. Za povezavo s senzorji in digitalnimi vhodi, oz. izhodi pa smo izbrali kar multifunkcijsko karto, ki ima 16 A/D, 1 D/A, 8 DI in 8 DO. Sam sistem se je že od začetka snoval za industrijsko okolje, tako da smo dodali še karto z relejskimi izhodi in opto ločitev za digitalne vhode.

Merilnik je nameščen na okviru C oblike in ga na merilno pozicijo pomakne pneumatski ventil. Zaradi odstranitve prahu, oljnih emulzij in drugih nečistoč, so ohišja senzorjev oblikovana tako, da skozi reže piha zrak pod tlakom in tako tvori zračno zaveso. Ker lahko umazanija kljub temu prekrije površino sensorja, ima sam senzor digitalni izhod, ki javlja, če je odbiti žarek premajhne intenzivnosti.



Slika 3.2: Shematski prikaz merilnika debeline

Ko senzor pomaknemo v merilni položaj ali pa je v mirovnem položaju, opravimo kontrolo pozicije s končnimi stikali. Sistem skupaj z opisanimi elementi je predstavljen na sliki 3.2:

#### 4. Izvedba merilnika

Senzor razdalje, ki smo ga uporabili, ima referenčno merilno točko na razdalji  $50\text{mm} \pm 1\text{mm}$  in merilno območje  $\pm 5\text{mm}$  z odstopanjem  $\pm 0.01\text{mm}$ . Valovna dolžina svetlobe je  $790\text{nm}$  (nevidna) z močjo  $5\text{mW}$ . Merilno območje (MO) merilnika je potem:

$$\text{MO} = 2.10 \text{ mm} - \Delta \quad (4.1)$$

$\Delta$  - maksimani možni pomik (vibracija) merjenca v smeri merilnega snopa

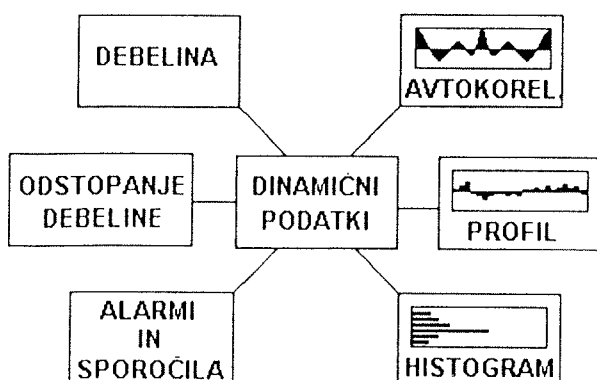
Senzor lahko meri oddaljenost predmetov, ki imajo primerno odbojno površino. Preizkusili smo meritve aluminija, iverice, nekaterih plastičnih materialov, papirja, pertinaksa,... tako da ocenjujemo, da je uporaben za vse veje industrije.

Za izvajanje merjenja in algoritma je izbran tipalni čas  $10 \text{ ms}$  zaradi naslednjih razlogov:

- časovna konstanta laserskega senzorja je  $5 \text{ ms}$
- frekvence, ki se pojavljajo na strojih, so  $< 50\text{Hz}$
- take tipalne čase srečujemo tudi pri merilnikih z drugimi vhodnimi senzorji.

#### 4.1 Izvedba izhoda

Ker smo hoteli na ekranu opazovati kar največ dinamičnih podatkov, smo se odločili za uporabo semigrafike, ki omogoča dovolj natančen prikaz, hkrati pa zaradi ohranitve delovanja v tekstualnem načinu pridobimo na hitrosti. Na ekranu lahko tako opazujemo naslednje dinamične podatke (slika 4.1) :



Slika 4.1: Dinamični podatki na zaslonu

**Debelino** dobimo po nekoliko modificiranem postopku, saj se za izračunavanje uporablja le celoštevilčna aritmetika. Da dobimo kvazi 16-bitno število, najprej pomaknemo 12-bitno vrednost iz A/D pretvornika za 4 bite v levo, . Tako zmanjšamo pogrešek pri celoštevilčnem deljenju. Ker nas pri tem merilniku zanima podatek o debelini do razreda  $10^{-2} \text{ mm}$ , opravimo tudi množenje s faktorjem 100. Tako dobimo naslednjo odvisnost:

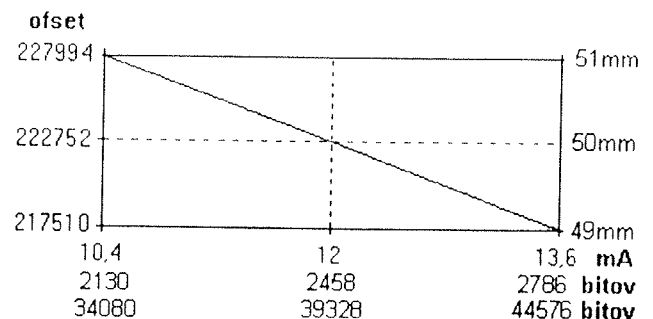
$$\text{razdalja} = \left( \frac{\text{vhod} \ll 4 + \text{ofset}}{\text{naklon}} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

*vhod* - 12-bitna vrednost iz A/D pretvornika  
*ofset, naklon* - faktorja, ki ju dobimo po preslikavi iz toka v razdaljo.

Ker je referenčna točka  $50\text{mm}$  podana  $\pm 1\text{mm}$ , je potrebno senzor pred vgraditvijo umeriti in določiti ofset (slika 4.2) po enačbi:

$$\text{ofset} = -3276.25 \cdot I_{vh} + 262067 \quad (4.3)$$

$I_{vh}$  - tokovni signal iz senzorja (mA)



Slika 4.2: Ofset - korekcijska krivulja

**Merilno odstopanje** uporabimo v regulacijski zanki avtomatske kontrole debeline (AGC). V konfiguracijsko datoteko lahko vpišemo faktor občutljivosti v  $\text{V/mm}$ .

**Vzdolžni profil** merjenca se prikazuje v pomičnem časovnem diagramu in sicer vidimo 30 preteklih merenj. Tak diagram uspešno nadomešča panelni instrument z ničlo na sredini.

V posebnem oknu se prikazujejo **alarmi in sporočila**, ki nas obveščajo o stanju merilnika. Ta sporočila se shranjujejo tudi v pomični pomnilnik, tako da lahko na samostojnem zaslonu pregledamo 23 zadnjih sporočil.

Histogram se izrisuje za 30 merilnih vrednosti. Področje izrisa je razdeljeno na dovoljeno (zelena) in na prekoščeno (rdeča barva) območje. Velikost dovoljenega območja se določi na osnovi vpisa tolerančnih mej pred pričetkom merjenja. Zaradi neproblematičnosti spominskega prostora in dovolj velike širine zapisa celoštevilčnih vrednosti razdalje, se kumulativno shranjujejo vse vrednosti debeline in se na koncu meritve izračuna

povprečni histogram za celotno meritev enostavno po enačbi za povprečno vrednost:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.4)$$

$x_i$  - posamezna meritev  
 $n$  - število vseh meritev

Med samo meritvijo je možen takojšen preklap med histogramom in avtokorelacijo. Zakaj avtokorelacija? Idealno bi bilo, da je površina merjenca čim bližje zahtevani in da z merjenjem dobimo minimalno odstopanje, oz. nek šumni signal minimalne amplitude. To pa pomeni, da bi naj šla vrednost avtokorelacijske funkcije proti 0. Zaradi različnih vzrokov (nelinearna regulacijska proga, zračnosti na obdelovalnem stroju) pa se nam lahko na površini pojavi vzorec, ki vsebuje tudi določene periodične signale. Prav te pa z avtokorelacijsko funkcijo dobro vidimo in jih potem po analizi vzroka odpravljamo. Avtokorelacijska funkcija je soda, tako da izračunamo le člene do  $n/2$ , zaradi dovolj spominskega prostora pa vhodni vektor kar podvojimo:

$$vh_i = vh_{i+n}, \forall i \leq n \quad (4.5)$$

$n$  - dolžina vhodnega vektorja

saj s tem enačbo za izračun avtokorelacije močno poenostavimo:

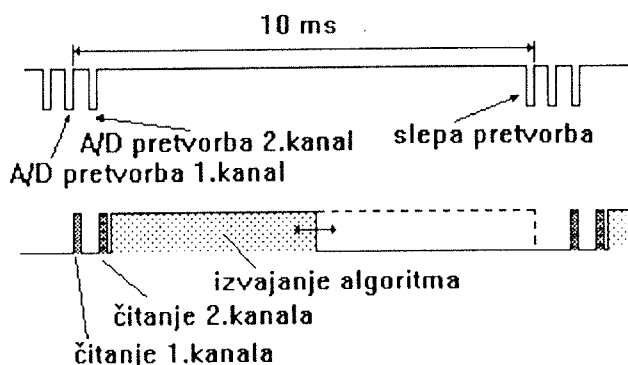
$$iz_i = \sum_{i=1, j=1}^{\frac{n}{2} \cdot n - 1} vh_{i+j+1} \cdot vh_j \quad (4.6)$$

zaradi simetrije pa velja tudi:

$$iz_i = iz_{n-i-1} \quad (4.7)$$

#### 4.2 Izvedba časovne baze

Na A/D karti je programabilni timer, kjer lahko nastavimo različne načine proženja, oz. štetja. Izbran je način, ko se po vpisu številne konstante prične odštevanje in ko



Slika 4.3: Časovni prikaz zaporedja A/D pretvorb in izvajanja algoritma

pride števec na nič, se na izhodu sproži signal za čas trajanja ene periode urinih pulzov. Princip postopka uporabljenega za doseg želenega tipalnega časa je predstavljen na sliki 4.3:

Pretvorbi merilnih rezultatov opravimo z minimalnim časom pretvorbe, nato pa opravimo "slepo" pretvorbo, tako da je vsota vseh časov enaka tipalnemu času. Pri takem načinu je nujno da se algoritem opravi v krajšem času kot "slepa" pretvorba.

Na koncu meritve se izriše v grafičnem načinu še celoten vzdolžni profil merjenca, v datoteko pa vpišejo odstopanja in kumulativni histogram, kar je pri sodobnem sledenju proizvodnje nujno (standard ISO 9000).

#### 5. Zaključek

S prototipom merilnika smo preskusili meritve debeline mnogih materialov. Posebej je potrebno biti pozoren pri umerjanju vsakega laserskega senzorja, da ne vnese mo v merilno verigo dodatnih pogreškov.

Sistem, ki je zgrajen z opisanim senzorjem razdalje, ima uporabno območje merjenja 20 mm z odstopanjem  $\pm 3 \cdot 10^{-2}$  mm. Pri tem je potrebno omejiti maksimalni odmik merjene površine z dodatnimi valjčnicami pred merilno glavo, ker maksimalni odmik od srednje pozicije pomeni zmanjšanje merilnega območja in povečuje dinamični pogrešek. Sistem je časovno stabilen in ne potrebuje zagonskega časa (delovna temperatura, drift parametrov), tako da je takoj po vklopu pripravljen za merjenje. Merilne rezultate smo potrjevali na Al pločevini različnih debelin in na ivernih ploščah različnih debelin z brušeno in nebrušeno površino.

Ker je možno priključiti več merilnih glav, ki so razporejene prečno, se ukvarjamo z določitvijo ustrezne interpolacijske funkcije in 3D izrisom celotne površine.

Prečni profil je možno dobiti tudi z ustreznim pogonom (koračni elektromotor, proporcionalni ventil), ko merilno glavo prečno pomikamo

Laserski merilnik lahko v večini primerov uspešno zamenja izotopske merilnike, ki s sevanjem v okolico povzročajo dodatne probleme (shranjevanje izotopov, periodični pregledi osebja, zavarovanje merilnega mesta, dodatna signalizacija...).

Z ustrežno analizo merilnega signala je možno dograditi diagnosticiranje napak na stroju (odprava zračnosti na ležajih, vodilih ...). Ker je možen vnos tehnologije direktno v merilnik (z disketo, serijska komunikacija), se merilnik enostavno vključuje v CIM ali pa povezuje z računalnikom na stroju.

Zaradi načina zajemanja podatkov se merilno območje spremeni enostavno z zamenjavo senzorjev, ki merijo v drugem merilnem območju.

Merilnik je nastal v sodelovanju med TF Maribor, Inštitu-  
tom za avtomatiko in Impol TEHNIKA d.o.o. Prva  
vgradnja naj bi bila na valjarni v DO IMPOL, Slovenska  
Bistrica

## 6. Zahvala

Za pomoč pri praktični izdelavi merilnika se zahvaljujem  
sodelavcu mag. Bojanu Marčiču in podjetju Impol TEH-  
NIKA, d.o.o.

## 7. Literatura:

/1/ Thomas G.Beckwith, Roy D.Marangoni, MECHANICAL MEAS-  
UREMENTS, str.365 - 401, 1990 University of Pittsburgh

/2/ Several authors, PROCESS INSTRUMENTS AND CONTROLS  
HANDBOOK, str. 9-5 do 9-18, 1974 Los Angeles

/3/ Ray Butow, DIMENSIONAL INSPECTION, Februar 1993, Meas-  
urements & Control, str. 124 - 127

/4/ A. Bauer, OPTISCHE DICKENMESSUNG, MAREC 1992, SEN-  
SOR REPORT, str. 20 - 22

/5/ FAG Radiometrie, INFORMATIONEN ZUM ANGEBOT, 1987

/6/ J. Hecht, UNDERSTANDING LASERS, IEEE 1991 New York,

*Darjan Gradišnik, dipl.ing.  
Impol TEHNIKA d.o.o.  
Partizanska 38  
Slovenska Bistrica*

*prof. Dali Donlagić, dr.dipl.ing.  
Laboratorij za aplikacije v avtomatiki  
TF Maribor*

**Prispelo: 29.07.93**

**Sprejeto: 03.09.993**