

33. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA

PROCEEDINGS

26. simpozijum
**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA**



20. simpozijum
CAD/CAM

29. simpozijum
NU – ROBOTI –FTS

35. simpozijum
**UPRAVLJANJE PROIZVODNOM U
INDUSTRIJI PRERADE METALA**

13. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Zlatibor, maj 2007.

33. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Adresa:

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Tel: 011-3370341, Fax: 011-3370364

El. pošta: jupiter@mas.bg.ac.yu

Tehnički urednici:

Prof. dr Ljubodrag Tanović

Doc. dr Radovan Puzović

Mr Mihajlo Popović

Nenad Nešić, dipl. maš. ing.

Zlatibor, maj 2007.

Tiraž: 200 primeraka

Štampa: **Planeta print**,

11000 Beograd, Ruzveltova 10, tel.: 011 3088 129

ISBN 978-86-7083-592-4

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Dimić, Z. KONFIGURACIJA JEDNE HIBRIDNE PETOOSNE MASINE	3.1
Petrović, P., Jakovljević, Ž. DINAMIČKA KOMPENZACIJA NEHOMOGENIH MAGNETSKIH SVOJSTAVA NESTACIONARNE FEROMAGNETNE METE KOD INDUKTIVNIH MERNIH SISTEMA VISOKE PRECIZNOSTI.....	3.7
Živanović, S., Dimić, Z. UPRAVLJANJE MODELA TROOSNE MAŠINE SA PARALELONOM KINEMATIKOM pn101 NA BAZI EMC SISTEMSKOG SOFTVERA	3.19
Tabaković, S., Zeljković, M., Gatalo, R. PRIMENA SAVREMENIH PROGRAMSKIH OKRUŽENJA ZA ANALIZU RADNOG PROSTORA PARALELNIH MEHANIZAMA.....	3.25
Петраков, В., Пасечник, В. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ 3-D ПОВЕРХОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ	3.31
Stojčić, M. DIGITALNO PRAKTIČNO PRAĆENJE: ALGORITAM SA VEKTORSKIM VREMENOM DOSTIŽIVOSTI.....	3.43
Menyhardt, K., Toth-Tascau, M. ESTIMATION OF ROBOT POSITIONING ERRORS	3.49
Vuković, N., Miljković, Z., Lazarević, M. СИМУЛАЦИЈА ХОДА ИНСЕКТА РОБОТА ПО РАВНОМ ТЕРЕНУ	3.55
Бобырь, Н., Яхно, Б. РАССЕЯННОЕ РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ	3.65
Хейфец, М., Чемисов, Б., Грецкий, Н. ТЕХНОЛОГИЈА НАНЕСЕНИЯ ФЕРРОПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	3.78
Клименко, С., Мельничук, П., Таповић, Л. СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	3.84
Полонский, Л., Kravchenko, M. DETERMINATION OF OPTIMAL DEPTH OF CUT FOR ROUGH MACHINING FOR GAS-THERMAL COATINGS APPLIED ON PRODUCT SURFACES.....	3.89
Raičević, Ž., Vukasojić, R. RAZVOJ PROCESA BRZE PROIZVODNJE METALNIH DJELOVA NA BAZI NANOŠENJA	3.92
Raičević, Ž., Vukasojić, R. PROCES BRZE IZRADE LASERSKIM OBLAGANJEM NA HIBRIDNIM OBRADNIM CENTRIMA	3.96



P.B. Petrović, Mr. Živana Jakovljević ¹

DINAMIČKA KOMPENZACIJA NEHOMOGENIH MAGNETSKIH SVOJSTAVA NESTACIONARNE FEROMAGNETNE METE KOD INDUKTIVNIH MERNIH SISTEMA VISOKE PRECIZNOSTI

Rezime

Savremeni merni sistemi za beskontaktno merenje pozicije metalnih objekata vrlo često su bazirani na primeni induktivnih senzora. Ovi senzori poseduju veliku rezoluciju, visoku tačnost, izuzetna dinamička svojstva i neosetljivost na sve oblike kontaminacije koji se sreću u industrijskim uslovima. Prirodna nelinearnost, kao i osjetljivost na promene temperature ambijenta se uspešno kompenzuju odgovarajućim konstrukcijskim rešenjima i primenom savremenih integrisanih mikroprocesorskih sistema. Osjetljivost induktivnih senzora na nehomogenost magnetnih svojstava objekta čija se distanca meri je jedan od kritičnih sistemskih problema koji ograničava primenu ove vrste senzora u visokopreciznim mernim sistemima koji rade sa nestacionarnim feromagnetnim metama. Dosadašnji pristup u rešavanju ovog problema je bio zasnovan na korekciji magnetne nehomogenosti mete ili na primeni kompenzacionih tabela. U oba slučaja, poboljšanja su ograničena razmera zbog toga što je magnetna nehomogenost feromagnetnih materijala nestacionarne prirode. U okviru ovog rada izlaže se jedan radikalno novi pristup koji je baziran na dinamičkoj kompenzaciji greške primenom multirezolucijske analize merenog signala. Multirezolucijskom dekompozicijom merenog signala u vremenskom i frekventnom domenu primenom diskretne vejtlet transformacije, izdvajaju se konačni skup fazno korektnih komponenata, medju kojima se prepoznaje i izdvaja ona komponenta koja nastaje kao posledica magnetne nehomogenosti materijala mete. Izborom odgovarajućeg oblika vejtleta, ova metoda se može uspešno primeniti i u realnom vremenu, sa minimalnim vremenskim kašnjenjem od samo nekoliko uzorka. Ova metoda je eksperimentalno verifikovana na lasersko-induktivnom mernom sistemu za merenje debljine gumiranog korda na liniji za kalandriranje.

1. UVOD

Tehnologija induktivnih beskontaktnih senzora za merenje deistance je tehnologija koja se široko primenjuje u savremenim sistemima industrijske automatizacije. Vrhunske performanse i neke specifičnosti koje ne poseduju druge vrste senzora čini tehnologiju induktivnih senzora pogodnom za gradnju različitih metroloških sistema, za najširi spektar primena u industriji.

Postoje dva karakteristična slučaja primene induktivnih senzora. U prvom slučaju relativni položaj mete u odnosu na senzor se menja samo u pravcu merne ose senzora, dok je njen položaj u poprečnoj ravni nepromenljiv – slučaj stacionarne mete. U drugom slučaju, meta je pokretna i u poprečnoj ravni, tako da induktivni senzor meri distancu na različitim lokacijama mete – nestacionarna meta.

Drugi slučaj je mnogo češći u praksi. Tipičan primer je induktivni senzorski sistem za merenje orbite obrtnog rukavca neke rotacione mašine (rotor turbine, rotor generatora, ili glavno vreteno mašine alatke), gde se koriste dva ortogonalna induktivna senzora ugrađena u sklop uležištenja. Svaki senzor meri pomeraj rukavca u jednom od dva ortogonalna pravca i tako generiše informaciju iz koje se izvodi orbita, odnosno

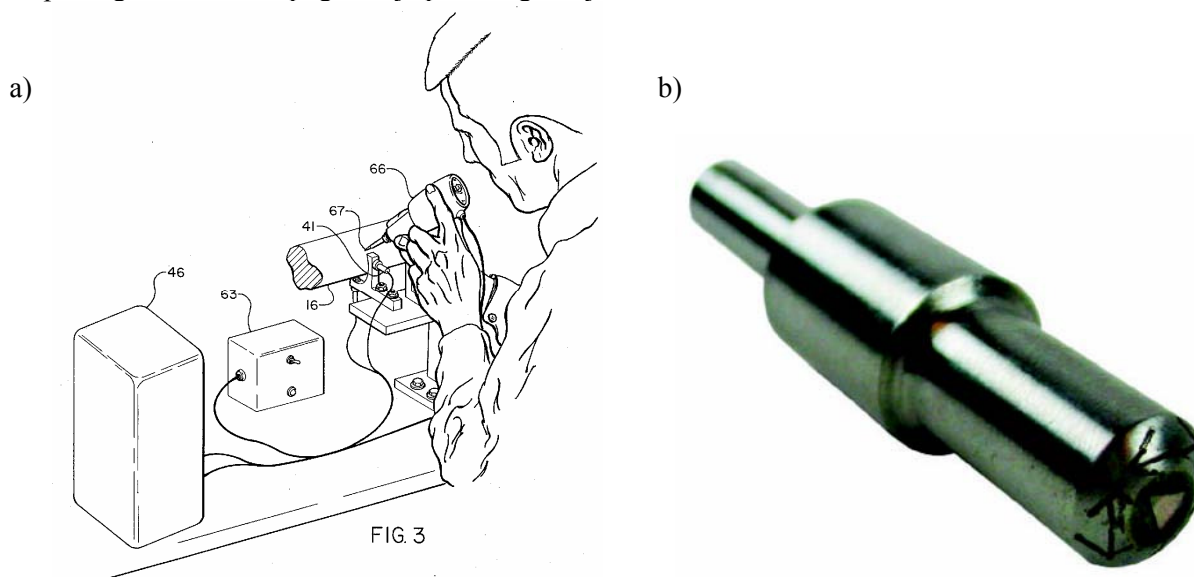
¹ Prof. dr Petar B. Petrović, Mr. Živana Jakovljević, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; e-mail: pbpetrovic@mas.bg.ac.yu

trajektorija ose rukavca u njegovoj ortogonalnoj ravni kao funkcija vremena. Drugi primer je lasersko-induktivni diferencijalni senzorski par pomoću koga se meri debljina nemetalnih folija (polimeri, elastomeri, celuloza, ...) u procesu njihove proizvodnje. U ovakvom senzorskom sistemu, induktivni senzor meri distancu do referentnog valjka na koji se oslanja folija, a laserski senzor meri distancu do folije, odakle se superponiranjem ove dve merene veličine izvodi informacija o trenutnoj vrednosti debljine folije.

Savremena tehnologija integrisanih mikroprocesorskih sistema, kao i konstruktivna unapredjenja pretvaračkog dela induktivnog senzora [1] omogućila su razvoj visokopreciznih induktivnih senzora sa linearnošću na mikrometarskom nivou i nanometarskom rezolucijom, uz istovremeno širok prenosni opseg koji se izražava desetinama kHz (tipično od 10 do 100 kHz -3dB, zavisno veličine senzora) i odličnom temperaturnom stabilnošću ($\leq 0.01\%$ FSO/°C) i radnim opsegom (-50 do +150 °C). Ipak, postoji jedan sistemski problem koji predstavlja ozbiljan nedostatak i ograničavajući faktor u primeni ovih senzora kod gradnje visokopreciznih metroloških sistema sa nestacionarnom metom. Taj problem je poznat pod nazivom električni radijalni udar.

Termin električni radijalni udar (na engleskom *electrical runout*) je izveden po analogiji sa mehaničkim radijalnim udarom, koji je odomaćen u mašinstvu i pomoću koga se iskazuje sumarno odstupanje geometrije oblika rukavaca od kružnosti i centričnosti u odnosu na neku referencu. Nestacionarna meta zbog promenljivih elektromagnetnih svojstava [1] generiše poremećaj koji induktivni senzor registruje kao pomeraj, iako taj pomeraj faktički ne postoji. U slučaju sistema za merenje orbite rukavca rotora (turbina ili gravno vreteno mašine alatke), neophodno je poznavanje radijalnog udara oslonca kao apriorne veličine, koja se zatim oduzima od pomeraja rukavca izmerenog pomoću induktivnog senzora i tako dobija stvarna vrednost pomeraja rukavca. Radijalni udar je u opštem slučaju zbir mehaničkog i električnog radijalnog udara. Mehanički radijalni udar je konstantna veličina, a električni radijalni udar to nije. Električni radijalni udar se spontano menja i zato je njegova korekcija pomoću stacionarnih kompenzacionih tabela praktično nemoguća, sem ukoliko se procedura njihovog ažuriranja ne sprovodi često.

Rešenje problema električnog radijalnog udara induktivnog senzora se uspešno sprovodi primenom neferomagnetnih materijala za izgradnju mete, primenom čaura od neferomagnetnog materijala, ili oslojavanjem feromagnetnih materijala prevlakama koje poseduju potreban nivo elektromagnetske izotropnosti (potrebna je relativno mala debljina prevlake zbog vrlo visoke frekvencije pobudnog kola solenoida induktivnog senzora, najčešće od 100 kHz do 2MHz zavisno od prečnika solenoida senzora). Nažalost, u jednom velikom broju slučajeva ovaj pristup se ne može primeniti i tada se koriste različite metode za korekciju magnetske nehomogenosti materijala [2]. Postoji niz proizvođača koji nude komercijalne sistema za ove potrebe (slika 1b), a koji su u osnovi bazirani na primeni rešenja opisanog u [2]. Postupak je vrlo delikatan, spor, zahteva iskusne i dobro obučene radnike, ali uz uvek prisutan rizik nesupešnog ishoda, čak i pogoršanja početnog stanja.



Slika 1: Prikaz rešenja za korigovanje elektromagnetske nehomogenosti navedenog u patentu [2] koje se sastoji iz mernog sistema koji registruje elektromagnetnu nehomogenost i mehaničkog pribora kojim se preciznim mehaničkim deformacijama lokalno koriguje kristalna struktura i samim tim i elektromagnetski parametri (a); Komercijalno raspoloživi mehanički alat sa dijamantskim vrhom za lokalnu promenu metrolofske strukture preciznim deformisanjem (b).

U okviru ovog rada izlaže se jedan novi pristup koji je baziran na dinamičkoj kompenzaciji greške primenom multirezolucijske dekompozicije merenog signala, a koji je razvijen u sklopu istraživačkih aktivnosti sprovedenih u okviru projekta TR-6362A². Prvo se u okviru poglavlja 2 daju osnovni elementi principa funkcionisanja induktivnog senzora, sa fokusom na uticaj metalurških svojstava materijala objekta. Zatim se u poglavlju 3 navodi kratak izvod osnova multirezolucijske dekompozicije signala primenom diskretne vejtlet transformacije i definiše osnova predloženog pristupa dinamičke kompenzacije nehomogenih magnetskih svojstava feromagnetne mete. U poglavlju 4 se navodi primer praktične implementacije ovog rešenja na lasersko-induktivnom mernom sistemu za merenje debljine gumiranog korda na liniji za kalandriranje. Presentacija razvijenog rešenja se završava diskusijom i pregledom daljih pravaca usavršavanja ovog rešenja.

2. INDUKTIVNI SENZOR

Induktivni senzor je elektromagnetni pretvarač koji registruje udaljenost elektroprovodne mete kompenzovanjem promene impedanse solenoida koji se pobudjuje stabilnim visokofrekventnim izvorom. Pretvarački mehanizam nije linearan i zato je neophodno ovu zavisnost linearizovati premenom odgovarajućih linearizacionih algoritama i kalibracionih procedura.

2.1 Princip funkcionisanja

Fizička osnova funkcionisanja induktivnog senzora bazirana je na preciznom merenju poremećaja primarnog magnetnog polja pod dejstvom vrtložnih struja generisanih tim magnetnim poljem u metalnoj meti. Veličina poremećaja magnetnog polja je proporcionalna distanci metalne mete, tako da se merenjem tog poremećaja, posredno meri distanca.

U svom osnovnom obliku izvodjenja, induktivni senzor se sastoji iz jednog solenoida koji se napaja visokofrekventnom strujom koju generiše precizno stabilisani oscilator. Solenoid induktivnog senzora generiše promenljivo magnetsko polje. Kada se u ovom magnetnom polju nadje neki elektroprovodni objekat, u njemu se zbog elektromagnetske indukcije javljaju vrtložne struje. Generalno, pojava vrtložnih struja kod većine električnih mašina je višestruko štetna, ali u ovom slučaju, vrtložne struje omogućavaju funkcionisanje induktivnog senzora (u zapadnoj literaturi, ovaj tip senzora se naziva *eddy-current* senzor, čime se na najdirektniji način ističe značaj vrtložnih struja za funkcionisanje induktivnog senzora).

Vrtložne struje generišu sekundarno magnetsko polje koje se superponira sa primarnim magnetskim poljem, što dovodi do smanjenja magnetskog fluksa u magnetskom kolu induktivnog senzora. Matematički model kojim se opisuje ovakav elektromagnetski sistema polazi od druge Maksimalove jednačine:

$$\text{rot}K = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

i generalisanog Amperovog zakona izraženog u diferencijalnom obliku:

$$\text{rot}H = J \quad (2)$$

Maksimalova jednačina definiše vezu izmedju jačine indukovanog magnetskog polja **K** i vektora magnetske indukcije **B**, dok druga jednačina povezuje primarno magnetsko polje **H** (magnetizaciono polje koje generiše solenoid induktivnog senzora) i gustinu Amperovih struja **J**.

Uz prethodne jednačine treba uvesti još dve dodatne relacije:

$$J = \sigma K \quad (3)$$

$$B = \mu H \quad (4)$$

od koji prva definiše vezu izmedju gustine Amperovih struja **J** i indukovanog magnetnog polja **K**, gde koeficijent proporcionalnosti σ označava specifičnu električnu provodnost materijala od koga je izradjena meta (Omov zakon u diferencijalnom obliku), dok druga relacija definiše vezu izmedju magnetske indukcije **B** i magnetizacionog polja **H**, gde koeficijent proporcionalnosti μ ima fizički smisao apsolutne magnetske permeabilnosti materijala mete.

Relacije (1) do (4) odnose se na opšti slučaj koji podrazumeva proizvoljni geometrijski oblika mete. U okviru [3] navodi se analiza jednog jednostavnog sistema sa metom pravougaonog oblika, dimenzija $a \times b$, izradjene od tankog lima debljine δ , a za uslov paralelnosti vektora magnetske indukcije **B** sa frontalnom površinom lima. Integracija polaznog sistema jednačina se ovim značajno pojednostavljuje. Modul kompleksne amplitude fluksa Φ magnetske indukcije **B** oslabljene dejstvom magnetskog polja koje indukuju vrtložne struje, izračunava se u analitičkom obliku i glasi:

² U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR-6362A: Revitalizacija i informaciona integracija proizvodnih resursa u cilju podizanja konkurentnosti Traval korporacije na međunarodnom tržištu, koji finansijski podržava Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.

$$\Phi = \Phi_0 \frac{\sqrt{2}}{k\delta} \sqrt{\frac{\cosh(k\delta) - \cos(k\delta)}{\cosh(k\delta) + \cos(k\delta)}} \quad (5)$$

gde je sa Φ_0 označena amplituda fluksa hipotetičkog sistema bez pojave vrtložnih struja, pri čemu je:

$$k = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (6)$$

Na osnovu relacija (5) i (6) sledi da je fluks primarnog magnetskog polja solenoida induktivnog senzora pored geometrijskih parametara mete, funkcija elektromagnetskih svojstava materijala mete - magnetske permeabilnosti i provodnosti i kružne frekvencije ω po kome se menja intenzitet primarnog magnetskog polja.

Bez obzira na činjenicu da se relacije (5) i (6) odnose na jedan specifičan slučaj koji je gruba aproksimacija realnog fizičkog sistema funkcionisanja induktivnog senzora, njihova vrednost za problematiku koja se razmatra u ovom radu je dovoljna u fenomenološkom smislu, jer one jasno identifikuju osnovne poremećajne faktore koji utiču na metrološka svojstva induktivnog senzora. Samo senzorski sistem koji poseduje stabilan oscilator za pobudu solenoida induktivnog senzora i koji poseduje metu sa stabilnim geometrijskim i elektromagnetskim karakteristikama može da bude precizan i visokorezolutni sistem. Kod idealnog induktivnog senzora, promena magnetskog fluksa iskazana relacijom (5) mora da se menja isključivo kao posledica promene distance između solenoida induktivnog senzora i mete. Mera stabilnosti geometrijskih i elektromagnetskih veličina mete, kao i stabilnost oscilatora pobudnog kola solenoida, je istovremeno i mera metrološkog kvaliteta jednog mernog sistema baziranog na induktivnom senzoru.

2.2 Vrtložne struje i fizička svojstva metala

Specifična provodnost u opštem slučaju nije konstanta već ona zavisi od velikog broja fizičkih veličina, pri čemu je, gotovo kod svih metala, dominantan uticaj temperature. Električna provodnost opada sa rastom temperature. Takodje, lokalne promene u sastavu legirajućih elemenata, kao i promene u kristalografskoj strukturi metala dovode do promene električne provodnosti, koja u ovom slučaju postaje funkcija površinskih koordinata mete.

Apsolutna magnetska permeabilnost definisana je relacijom:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (5)$$

gde je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ fizička konstanta i označava magnetsku permeabilnost slobodnog prostora, a μ_r je relativna magnetska permeabilnost materije koja je za sve materijale, sem za dijamagnetike, veća od jedinice. Relativna magnetska permeabilnost može se uslovno koristiti i za feromagnetske materijale, ali se tada mora uzeti u obzir da je μ_r funkcija jako zavisna od \mathbf{H} i od kristalografske strukture materijala.

Feromagnetski materijali od koji se najčešće izrađuju mašinski delovi su nehomogene strukture u elektromagnetskom smislu. Nehomogenost strukture može da bude posledica metalurških svojstava materijala i posledica mehaničke i termičke obrade u svim fazama nastajanja jedne mašinske komponente [3], [4].

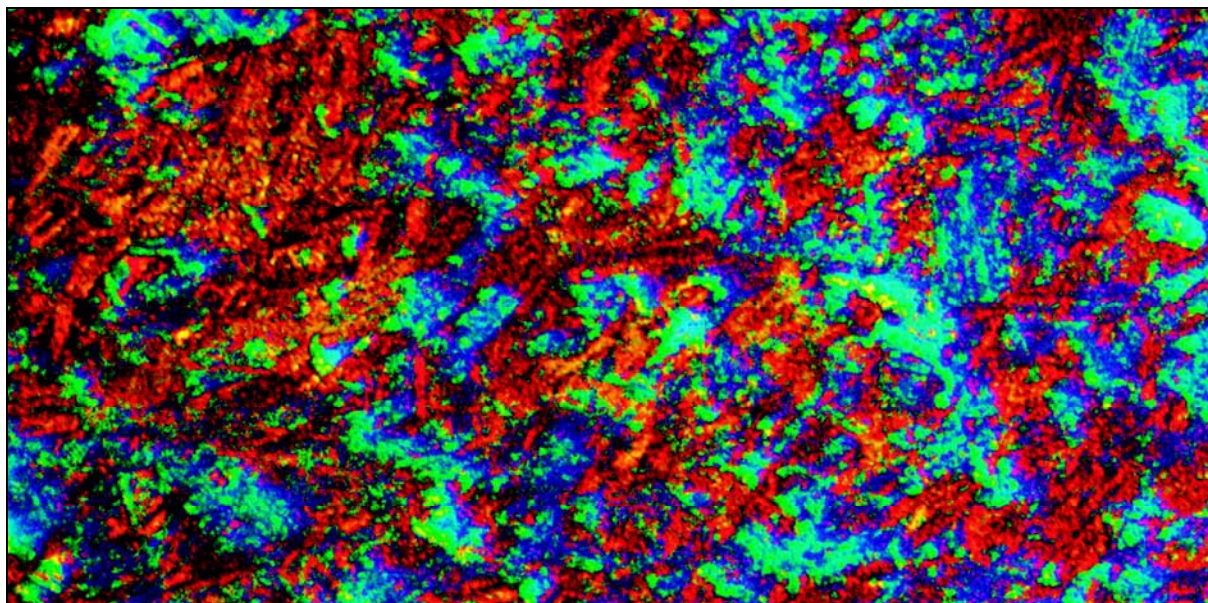
Nehomogenost strukture metalurškog tipa, odnosno anizotropnost u sastavu (količina i difuzija legirajućih elemenata i prisustvo nečistoća), kristalnoj strukturi (pravilnost rešetke, veličina zrna i raspored zrna), orijentaciji kristalne rešetke (orijentacija zrna), kao i fazne promene koje nastaju kroz varijantne oblike krive očvršćavanja (a koje dovode do varijantnih kristalnih transformacija), dovodi do elektromagnetske nehomogenosti materijala, odnosno magnetske permeabilnosti i provodnosti koje nisu konstantne već se menjaju po nekom slučajnom zakonu u makro razmerama. Neki od kristalnih oblika su krupnozrnog a neki sitnozrnog sastava; neki su stabilnog a neki nestabilnog tipa, orijentacija magnetskih osa kristalnog zrna nije uniformno raspoređena u prostoru, . . . Na primer, umesto da se očvršćavanjem čelika normalno dobijaju ferit i cementit, asustenit kao stabilna faza na visokoj temperaturi stvara novu fazu koja se naziva martenzit. Martenzit se odlikuje kristalnom nestabilnošću na sobnoj temperaturi. Pod određenim uslovima očvršćavanja formiraju se strukture koje se sastoje iz većeg broja faza, koje su međusobno pomešane, po pravilu neravnomerno, što dovodi do drastične metalurške anizotropnosti na makro nivou. Na spojevima ovih faza dešavaju se različite interakcije na atomskom nivou, koje dalje produkuju nestabilnu strukturu, koja se menja spontano (puzanje) ili pod dejstvom spoljašnjeg radnog opterećenja. Metalurška anizotropnost iz prethodnih razloga je inherentno promenljiva – materijal se u elektromagnetskom smislu ponaša kao 'živa' struktura.

Nehomogenost strukture koja nastaje kao posledica mehaničke obrade i to u svim fazama prerade, od primarne kod proizvodnje polufabrikata do finalnog brušenja ili poliranja, i termičke obrade koja se normalno koristi da bi se postigle odgovarajuće mehaničke karakteristike zahtevane funkcijom dela u sklopu u koji se ugrađuje, ima za posledicu nehomogenost strukture materijala koja je vrlo slična nehomogenostima metalurškog tipa. U ovom kontekstu je poznat primer 'efekta kalandriranja (valjanja)' gde postupak prerade

dovodi do sistematskog preusmeravanja kristalne strukture, narušavajući prirodnu kristalnu anizotropnost stohastičkog tipa na mikro nivou koja na makro nivou generiše kvazi izotropna svojstva (pitanje razmera). Efekat kalandriranja usmeravanjem kristala dovodi do pojave anizotropnosti na makro nivou, sa drastičnim razlikama u svim mehaničkim i elektromagnetskim osobinama materijala, bez obzira na hemijski sastav materijala. Slični efekti se dobijaju u tehnologiji rotacionog kovanja koja se koristi za izradu polufabrikata šipkastog oblika, velikog prečnika. Termička obrada ima izuzetan uticaj na metaluršku strukturu. Efekti poremećaja nastali nekim vrstama obrade se kasnije mogu samo delimično eliminisati i u tom smislu termička obrada može da se vrlo efikasno iskoristi.

Nehomogenosti metalurškog tipa mogu da budu posledica i nepažljivog rukovanja (koncentrisani udari koji nastaju u fazi montaže ili kao posledica neadekvatne manipulacije), što se može svesti na slučaj mehaničke obrade.

Prisustvo zaostalog magnetizma takodje dovodi do elektromagnetne anizotropnosti. Na fotografiji ispod prikazana je primer izgleda strukture legiranog čelika koji je dobijen postupkom metalografskog snimanja polarizovanom svetlošću pod mikroskopom sa 50 x uveličanjem. Jasno se uočava nehomogena kristalna struktura sa neravnomerno raspoređenim i slučajno orijentisanim kristalnim zrnima tipa martenzitnih formacija i delta-feritnih formacija, uz značajno prisustvo bakarnih primesa. Ovakva anizotropnost rezultuje veliku elektromagnetsku nehomogenost. Šarenilo boja je istovremeno i šarenilo elektromagnetskih svojstava! Prisustvo nestabilnih martenzitnih formacija ovu anizotropnost čini nestacionarnom. U fazi eksploatacije, kada je deo izradjen od ovakvog materijala izložen mehaničkim opterećenima, dolazi do intenziviranja ove nestacionarnosti, što za posledicu ima i značajnu nestacionarnost svih elektromagnetskih veličina materijala.



Slika 2: Primer metalografskog izgleda uzorka nerđajućeg čelika martenzitnog tipa, čija metalurška struktura sadrži elektromagnetsku anizotropnost takvog tipa koja generiše veliki poremećaj u radu induktivnog senzora.

Elektromagnetska anizotropnost se pre svega povezuje sa feromagnetnim materijalima. Kod neferomagnetnih materijala ovaj problem je drastično manji i sa aspekta tehnologije induktivnih senzora se može smatrati da praktično ne postoji. Problem je u tome što se odgovorni mehanički delovi po pravilu izradjuju od feromagnetnih materijala, odnosno od visokolegiranih čelika.

3. DINAMIČKA KOMPENZACIJA ELEKTROMAGNESKE ANIZOTROPNOSTI

Zbog svoje nestacionarnosti, elektromagnetske anizotropnosti onemogućava direktnu primenu kompenzacionih tabela za korigovanje greške merenja. Ipak, apriorna znanja o karakteru poremećaja ovog tipa otvaraju mogućnost prepoznavanja komponente signala koji dolazi od elektromagnetske anizotropnosti, a zatim i izdvajanja ove komponente iz korisnog signala. Ovakav pristup je radikalno drugačiji u odnosu na pristup baziran na kompenzacionim tabelama, zato što on ne sadrži inherentni problem nestacionarnosti

elektromagnetske anizotropnosti. Kompenzacione tabele su statičke. Prepoznavanje a zatim i potiskivanje poremećaja je dinamički proces.

Ovakim pristupom se polazni problem prevodi u dva odvojena problema: 1)problem dekompozicije signala na konačni skup fazno korektnih komponenata i 2)problem karakterizacije signala poremećaja izazvanog elektromagnetskom anizotropnošću, dovoljne za njegovo kategoričko prepoznavanje unutar skupa komponenti na koji je razbijen originalni signal.

Konvencionalne tehnike multirezolucijske analize signala bazirane su na filtriranju signala niskofrekventnim filterima. Pri tom se najčešće sprovodi analiza sa dva nivoa, gde se jedan filter koristi za uklanjanje visokofrekventnih, a drugi za uklanjanje niskofrekventnih sadržaja. Definisanje odgovarajućih filtera je složen zadatak, a njihova primena najčešće zahteva veliki broj računskih operacija što je nepovoljno sa aspekta primene u realnom vremenu. Ovakvo filtriranje najčešće nije fazno korektno. Takodje, ovakvo filtriranje nije reverzibilan proces – jednom filtriran signal se ne može na osnovu dobijenog filtriranog signala rekonstruisati. Pristup koji se koristi za multirezolucijsku analizu, odnosno dekompoziciju signala induktivnog senzora zasnovan je na diskretnoj vejtlet transformaciji (DWT) [5].

Osnovna ideja dekompozicije signala koja se ovde koristi proizilazi iz rada izloženog u okviru [6], a zasniva se na ideji da se informacija koju signal nosi može reorganizovati kao skup detalja koje on sadrži na različitim rezolucijama. Naime, ako je dat skup rezolucija 2^j , $j \in \mathbf{Z}$, skup detalja koje signal sadrži pri rezoluciji 2^j dat je razlikom njegove aproksimacije pri rezoluciji 2^j i 2^{j-1} . Drugim rečima, svaki signal f se može prikazati kao suma njegove aproksimacije na rezoluciji $J - A_j f$ i detalja $- D_j f$, $j \in [1, J]$ koji su mu oduzeti pri prelaski sa sa viših na niže rezolucije. Na osnovu prethodnog važi:

$$f = A_J f + \sum_{j=1}^J D_j f \quad (7)$$

Aproksimacija funkcije na rezoluciji 2^j , može se odrediti dekomponovanjem funkcije f na ortonormalni bazis $\{\phi_{j,n}(x) = 2^{-j/2} \phi(2^j x - n), j, n \in \mathbf{Z}\}$ koji se naziva ortonormalni bazis funkcija skaliranja, gde je ϕ tzv. funkcija skaliranja, x nezavisno promenljiva, a n faktor koji definiše translaciju funkcija skaliranja duž ose x . Dakle, aproksimacija signala na rezoluciji j data je relacijom:

$$A_j f = \sum_n \langle f, \phi_{j,n} \rangle \phi_{j,n} = \sum_n a_n^j \phi_{j,n} \quad (8)$$

i okarakterisana je skupom skalarnih proizvoda odnosno, koeficijenata aproksimacije $a_n^j = \langle f, \phi_{j,n} \rangle$, $n \in \mathbf{Z}$ gde operator $\langle \rangle$ označava skalarni proizvod.

Pri aproksimiranju funkcije na nižoj rezoluciji (pri porastu j), dolazi do gubitka određenih informacija. Pokazuje se da, kada su određeni uslovi ispunjeni, detaljno obradeno u okviru [5], [6] i [7], postoji ortonormalni vejtlet bazis $\{\psi_{j,k} = \psi(2^j x - n), j, n \in \mathbf{Z}\}$, gde je ψ funkcija koja se naziva vejtlet, x nezavisno promenljiva, a n faktor koji definiše translaciju vejtleta duž ose x , takav da važi:

$$A_{j-1} f = A_j f + \sum_n \langle f, \psi_{j,n} \rangle \psi_{j,n} \quad (9)$$

Detalji koji su oduzeti signalu pri prelasku sa rezolucije 2^j na rezoluciju 2^{j-1} dati su relacijom:

$$D_j f = \sum_n \langle f, \psi_{j,n} \rangle \psi_{j,n} = \sum_n d_n^j \psi_{j,n} \quad (10)$$

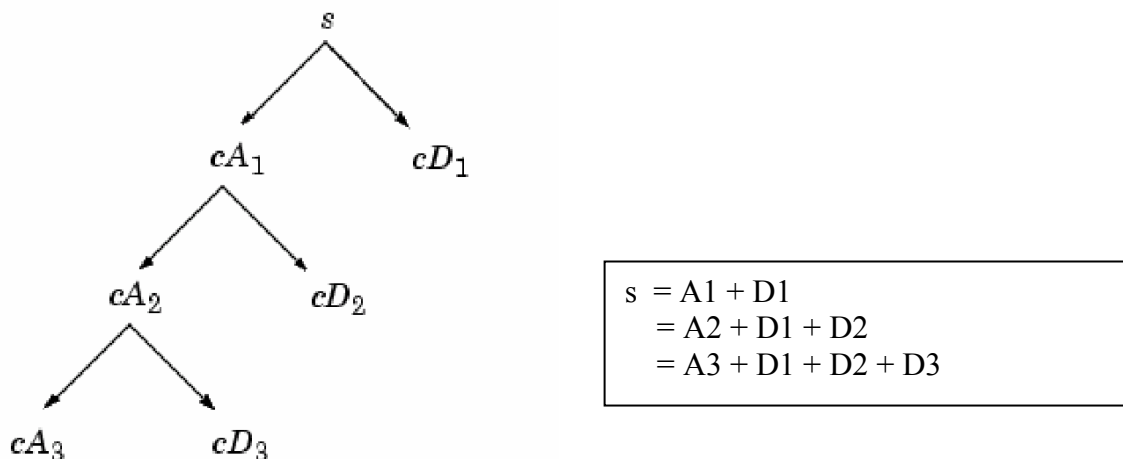
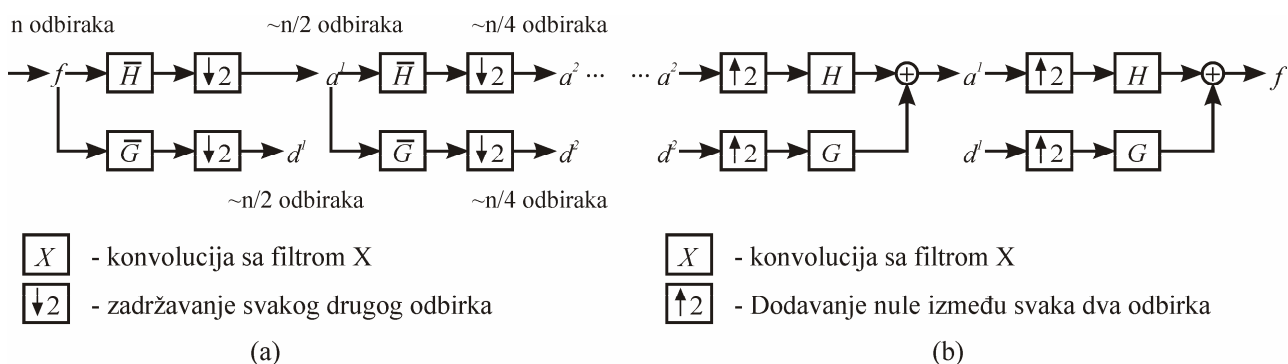
i okarakterisani su skupom skalarnih proizvoda odnosno, koeficijenata detalja $d_n^j = \langle f, \psi_{j,n} \rangle$, $n \in \mathbf{Z}$.

Koeficijenti a_n^j i d_n^j se dobijaju takozvanom šemom filtriranja koja predstavlja vejtlet reprezentaciju tj. diskretnu vejtlet transformaciju polaznog signala f . Postoji više različitih familija funkcija skaliranja i njima odgovarajućih familija vejtleta u obliku: $\{\phi_{j,n}(x) = 2^{-j/2} \phi(2^j x - n), j, n \in \mathbf{Z}\}$, odnosno $\{\psi_{j,k} = \psi(2^j x - n), j, n \in \mathbf{Z}\}$ koje čine ortonormalni bazis. One se opisuju vejtletima $\psi_{0,1}$ kao tipičnim predstavnicima. U zavisnosti od svojih karakteristika, različiti vejtleti (na osnovu kojih se definišu različiti ortonormalni bazisi) su svrstani u određene familije, kao što su Daubechies vejtleti, simlet-i, coiflet-i, biortogonalni vejtleti... Izbor vejtleta, pa samim tim i ortonormalnih bazisa funkcija skaliranja zavisi od željenih rezultata analize signala.

Multirezolucijska dekompozicija signala primenom DWT daje brz jednoprolazni hijerarhijski algoritam za izračunavanje koeficijenata aproksimacije a_n^j i detalja d_n^j , tj. za izvođenje DWT koji se može opisati šemom filtriranja prikazanom na slici 3.

Korišćenjem prikazanog hijerarhijskog algoritma koeficijenti detalja d_n^j se izračunavaju na osnovu koeficijenata aproksimacije a_n^{j-1} i to njihovim filtriranjem visokofrekventnim filtrom \bar{G} a zatim uzimanjem svakog drugog (obično parnog) odbirka. Analogno, koeficijenti aproksimacije a_n^j se izračunavaju filtriranjem koeficijenata a_n^{j-1} niskofrekventnim filtrom \bar{H} i uzimanjem svakog drugog odbirka.

Formiran je i reverzibilan algoritam [5] za izračunavanje signala f na osnovu koeficijenata a_n^j i d_n^j , tj. za izvođenje inverzne DWT. On se može opisati šemom filtriranja datom na slici 3b. Koeficijenti aproksimacije a_n^{j-1} se izračunavaju tako što se između svaka dva koeficijenta a_n^j i d_n^j ubacuje po jedna nula, a zatim se vrši konvolucija ovako dobijenih sekvenci sa filterima H i G i rezultujuće sekvence se, konačno, sabiraju.



Slika 3: Šema filtriranja za proračun: (a) direktne DWT; (b) inverzne DWT; u donjem delu slike dat je grafički prikaz dendritske strukture šeme filtriranja.

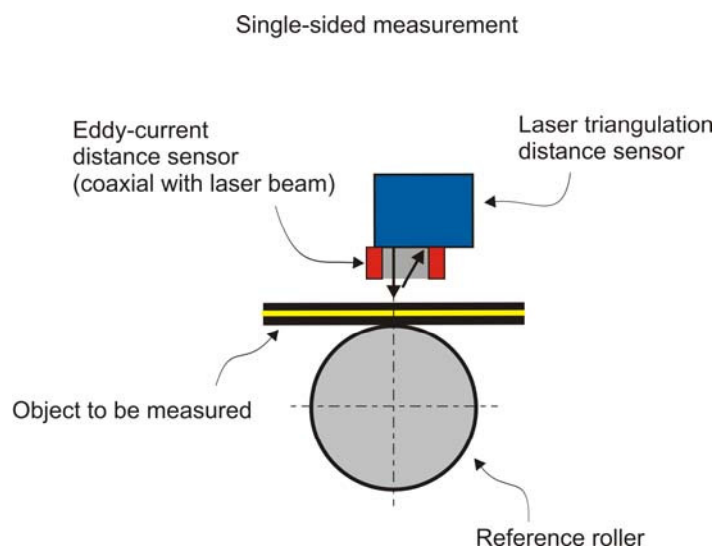
Filteri H , G , \bar{H} i \bar{G} predstavljaju simetrične konjugovane filtere i oni se izračunavaju na osnovu odabranog vejevleta, odnosno familije funkcija skaliranja [5]. Impulsni odziv ovih filtera predstavljen je nizom konačnog broja koeficijenata koji može biti vrlo mali što je izuzetno značajno sa aspekta primene date postupka u realnom vremenu. Na primer za vejevlete iz Daubechies familije ovaj broj je $2K$, gde je $K \in \mathbb{N}$ red vejevleta u datoj familiji.

Šema filtriranja za izvođenje inverzne DWT može se iskoristiti za izračunavanje aproksimacije signala na rezoluciji (nivou DWT) $J - Af$ (relacija (9)) ako se koeficijenti detalja d_j^n , $j \in [1, J]$ – relacije (7 i 10) tokom proračuna proglašavaju za nule. Detalji Df se mogu izračunati na sličan način.

Primenom postupka dekompozicije izloženog u prethodnom delu teksta moguća je fazno korektna ekstrakcija različitih informacionih sadržaja iz jednog nestacionarnog signala. Ovde se polazi od pretpostavke da različiti procesi generišu svoje sadržaje koji se mogu prepoznati na različitim razmerama jednog te istog talasnog oblika (vejevlet) koji je izabran za dekompoziciju tog signala filtracijom. Problem karakterizacije signala poremećaja je relativno lako rešiv. Po pravilu se radi o komponenti najnižeg spektralnog nivoa, komponenti koja se u analizi vremenskih serija karakteriše kao trend ili bazna linija nestacionarnog signala [8] i njeno potiskivanje se svodi na generički problem potiskivanje nekog određenog pozadinskog signala.

4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

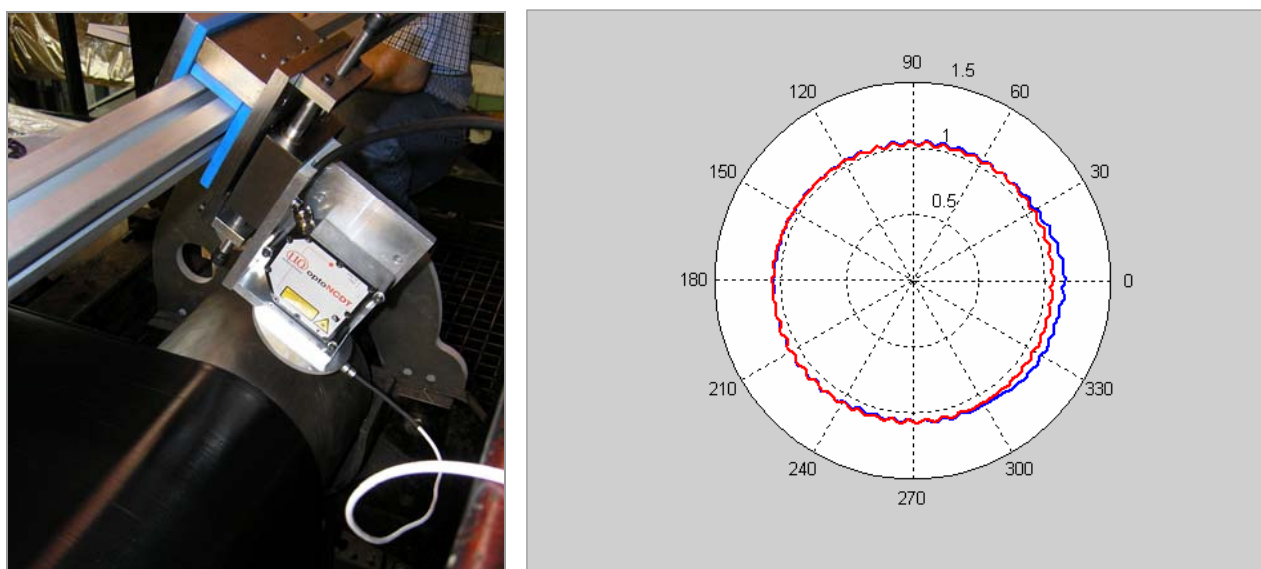
Verifikacija ravijene metode je sprovedena na lasersko-induktivnom mernom sistemu za merenje debljine gumiranog korda na linijama za kalandriranje. Prva merenja su sprovedena na liniji za gumiranje tekstilnog korda u Trayal korporaciji, gde je prepoznat problem i utvrdjene njegove realne implikacije na rad mernog sistema. Koncept mernog sistema prikazan je na slici 4.



Slika 4: Koncept diferencijalnog senzorskog para baziranog na induktivnom senzoru i laserskom triangulacionom senzoru.

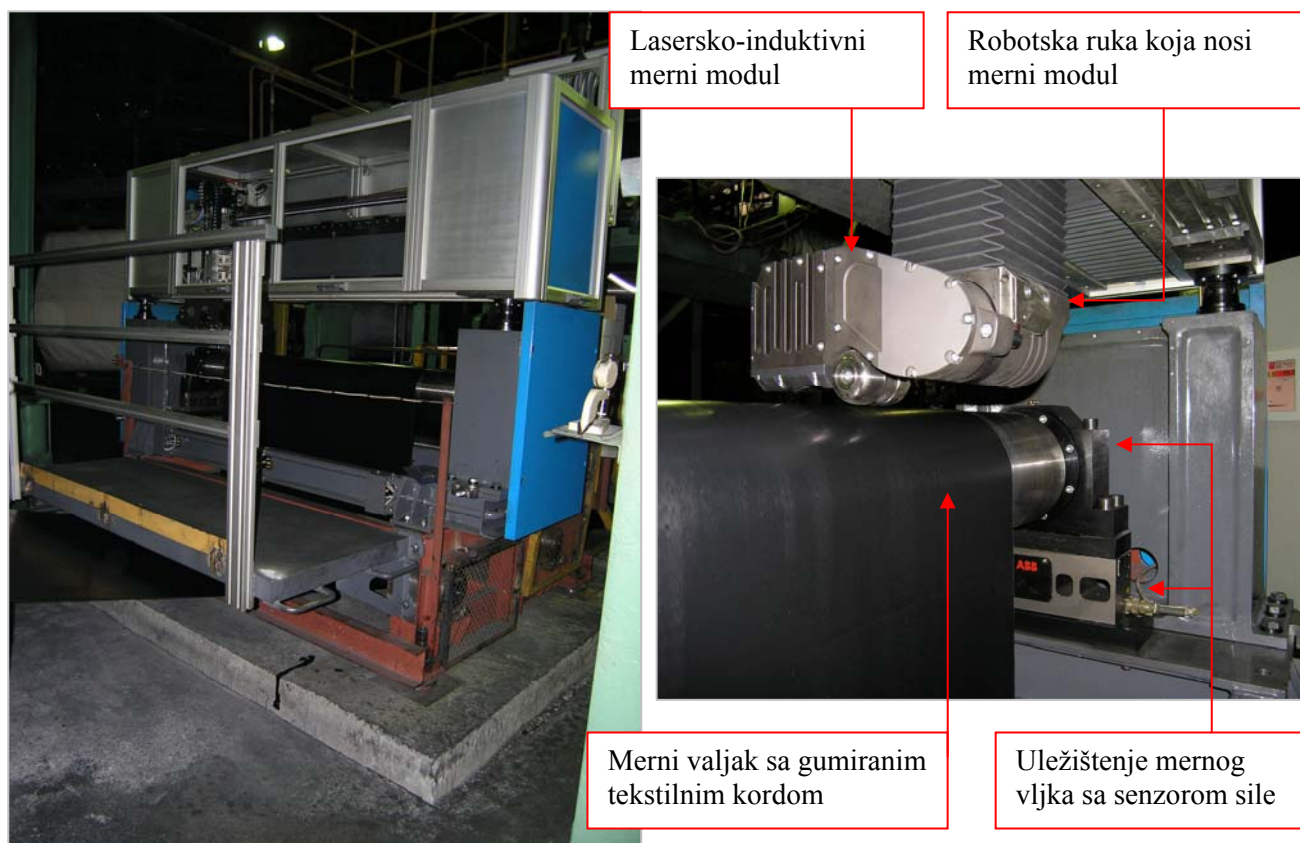
Merni sistem je diferencijalnog tipa. Induktivni senzor generiše informaciju o položaju referentne merne ravni, odnosno precizno obradjene površi mernog valjka na koji se oslanja gumirani kord u procesu njegove proizvodnje. Laserski triangulacioni senzor meri takodje distancu, ali za razliku od induktivnog senzora, laserski zrak nema mogućnost penetracije kroz gumirani kord – primarna funkcija laserskog senzora je merenje distance do vidljive površi mernog valjka ili gumiranog korda. Superponiranjem ove dve informacije, generiše se informacija o debljini gumiranog korda. Velika rezolucija laserskog senzora i velika brzina uzorkovanja omogućavaju ne samo merenje debljine, već i merenje teksture gumiranog korda, sa geometrijskom moći razlučivanja detalja na nivou 10 μm .

Na delu referentnog valjka na kome nema gumiranog korda, laserski i induktivni senzor mere distancu do jedne zajedničke površi – površ mernog valjka. Oba senzorska signala moraju da budu uparena, odnosno da generišu nultu debljinu objekta merenja. Ova pogodnost se koristi za autokalibraciju sistema. Istovremeno, ovim se omogućava vrlo precizna identifikacija poremećaja u radu induktivnog senzora koji izaziva elektromagnetska nehomogenost materijala mernog valjka. Na slici 5 prikazana je korišćena merna instalacija i zapis koji su generisali induktivni i laserski senzor na mestu kalibracije. Očigledan je uticaj elektromagnetske nehomogenosti materijala na rad induktivnog senzora.

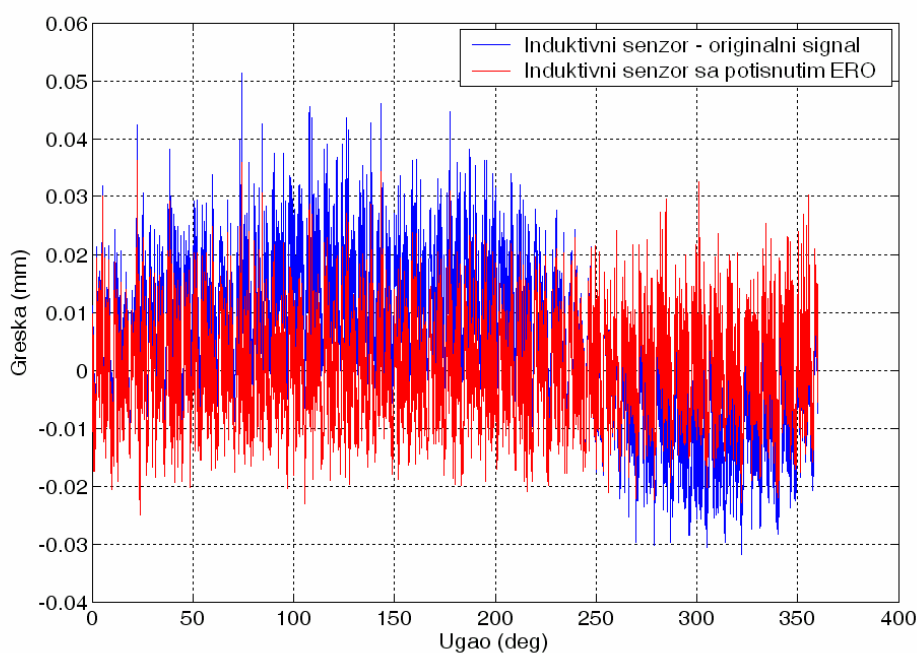


Slika 5: Fotografija merne instalacije primenjene na kalandru Repiquet u Trayal korporaciji i grafik koji pokazuje zapis induktivnog (plavo) i laserskog senzora (crveno); mehanička komponenta radijalnog udara registruje se laserskim senzorom, razlika zapisa induktivnog i laserskog predstavlja komponentu električnog radijalnog udara; sinhrona modulacija oba zapisa je posledica vibracija mernog sistema koja se otklanja diferencijalnom konfiguracijom.

Detalja istraživanja su sprovedena na laserskom mernom sistemu koji je razvijen za potrebe ruske kompanije Amtel, VOLTAIR iz Volgograda. Izgled razvijenog i instaliranog mernog sistema je prikazan na slici 6. Primer merenog signala koji je generisan na ovoj mernoj stanici navodi se na slici 7.



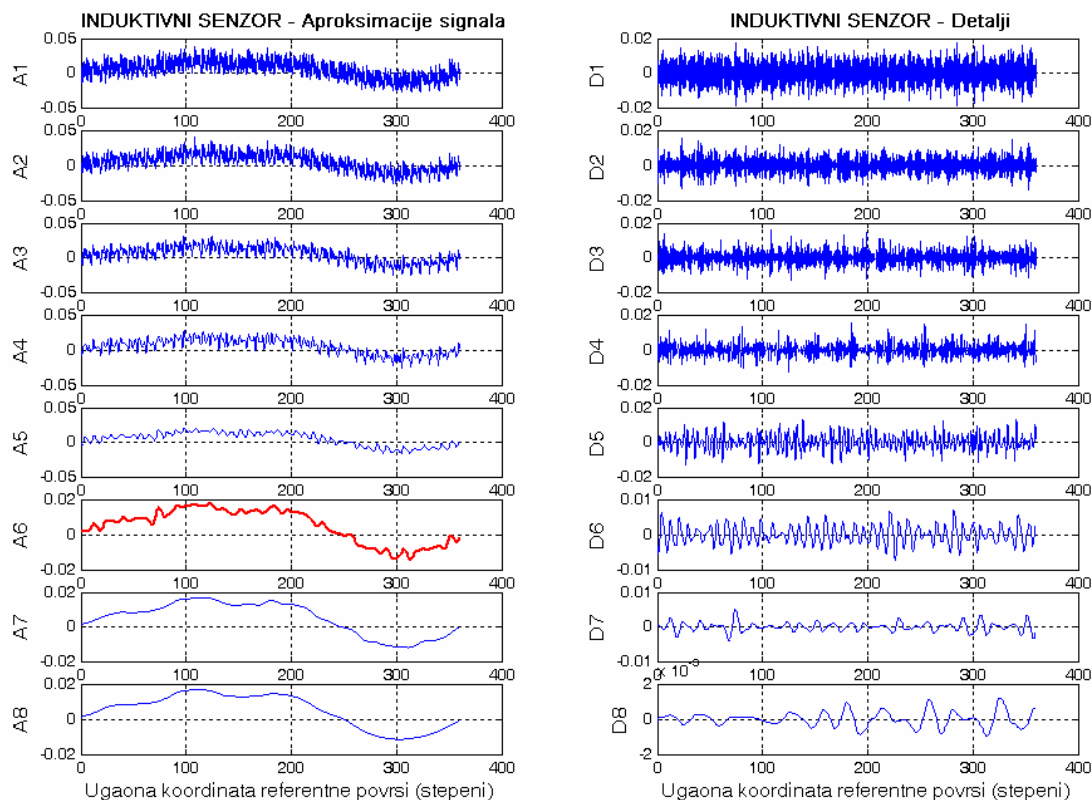
Slika 6: Fotografija merne instalacije primenjene na liniji za kalandriranje gumiranog tekstilnog korda u fabrici Amteal VOLTAIR, Volgograd, Rusija.



Slika 7: Originalni signal induktivnog senzora i isti taj signal sa uklonjenom komponentom koja dolazi od elektromagnetske anizotropnosti materijala valjka (zabeleženo u realnim mernim uslovima – linija za kalandriranje gumiranog tekstilnog korda).

Prvi korak je prevodjenje senzorskih signala iz vremenskog u ugaone koordinate mernog valjka. Za ove potrebe ugrađen je odgovarajući obrtni enkoder sa rezolucijom od 0.25° . Prevodjenjem senzorskih signala iz vremenskog u prostorni domen, komponenta koja dolazi od poremećaja izazvanog elektromagnetnom nehomogenošću mernog valjka postaje konstantna.

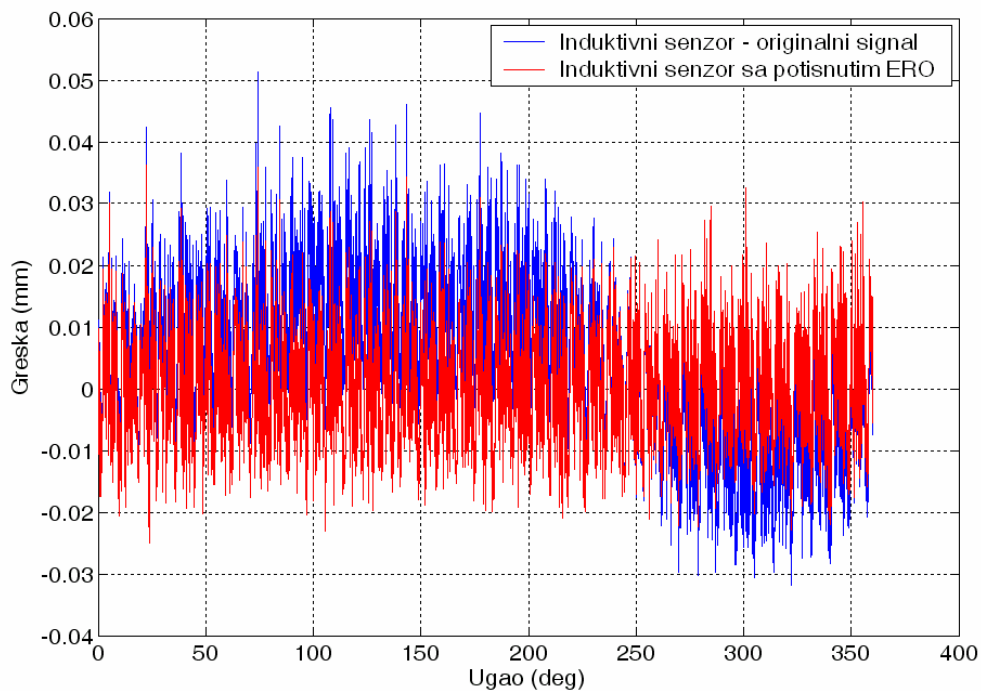
Signal induktivnog senzora iskazan u ugaonim koordinatama se zatim dekomponuje preme prethodno navedenom postupku. Za konkretan slučaj dekompozicije signala induktivnog senzora odabran je vejtlet db4 (četvrti vejtlet iz Daubechies familije vejtleta) [6], [7]. Broj koeficijenata u impulsnom odzivu konjugovanih simetričnih filtera H , G , \overline{H} i \overline{G} koji odgovaraju ovom vejtletu je 8, što znači da je na svakom nivou DWT potreban bafer od po samo 8 odbiraka za sprovođenje konvolucije. Ovo je izuzetno značajno sa aspekta primene predloženog algoritma u realnom vremenu, kao i u tehničkim performansama mikroprocesorskog sistema na kome se kompletan algoritam implementira. Signal induktivnog senzora dekomponovan na 8 nivoa prikazan je na slici 8.



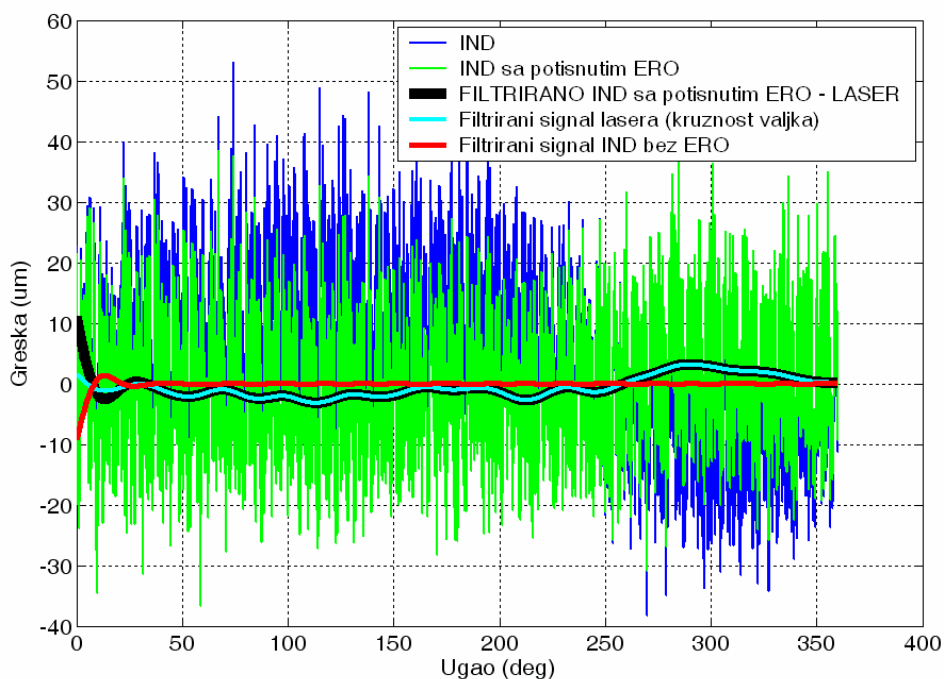
Slika 8: Sekvenca signala induktivnog senzora (signal preveden u ugaone koordinate mernog valjka) dekomponovana pomoću DWT i db4 vejtleta na osam nivoa.

Analizom karaktera aproksimacija na najvišim nivoima (nivo 4 i dalje) utvrđeno je da je aproksimacija na nivou A6 nosi najbolje izolovan sadržaj koji odgovara poremećaju izazvanom elektromagnetnom anizotropnošću. Uklanjanjem ove komponente dobija se korigovan signal induktivnog senzora, odnosno signal sa kompenzovanom greškom elektromagnetske anizotropnosti materijala valjka. Na slici 9 prikazan je originalni i kompenzovani signal induktivnog senzora.

Provera efektivnosti procedure može se izvršiti uvodjenjem signala laserskog senzora. Laserski senzor registruje samo geometrijska svojstva valjka, odnosno mehanički radijalni udar. U idealnom slučaju razlika između laserskog signala i signala induktivnog senzora sa uklonjenim poremećajem izazvanim elektromagnetnom anizotropnošću je jednaka komponenti mehaničkog radijalnog udara. Na slici 10 prikazan je grafik na kome su navedeni karakteristični signali: 1) originalni signal induktivnog senzora (plavo), 2) signal induktivnog senzora sa uklonjenom komponentom bazne linije nestacionarnog signala (zeleno), 3) NF filtrirani signal razlike kompenzovanog signala induktivnog senzora i laserskog senzora (crno), 4) NF filtrirani signal laserskog senzora koji prikazuje odstupanje mernog valjka od kružnosti, odnosno njegov mehanički radijalni udar (cijan) i 5) NF filtrirani kompenzovani signal induktivnog senzora. Zbog inherentne greške algoritma NF filtracije svi signali na koordinati bliskoj 0° nisu verodostojni.



Slika 9: Originalni signal induktivnog senzora (plavo) i signal sa uklonjenom komponentom koja dolazi od elektromagnetske anizotropnosti materijala valjka (crveno).



Slika 10: Uporedni prikaz zapisa induktivnog i laserskog senzora: 1) originalni signal induktivnog senzora (plavo), 2) signal induktivnog senzora sa uklonjenom komponentom bazne linije nestacionarnog signala (zeleno), 3) NF filtrirani signal razlike kompenzovanog signala induktivnog senzora i laserskog senzora (crno), 4) NF filtrirani signal laserskog senzora koji prikazuje odstupanje mernog valjka od kruznosti, odnosno njegov mehanički radijalni udar (cijan) i 5) NF filtrirani kompenzovani signal induktivnog senzora.

Uočava se gotovo savršeno poklapanje filtriranog signala laserskog senzora i filtriranog signala induktivnog senzora. Ovakva situacija znači da je uklanjanjem komponente bazne linije nestacionarnog signala induktivnog senzora, istovremeno uklonjena i komponenta koja dolazi od mehaničkog radijalnog udara. Ova tvrdnja se potvrđuje prikazom filtriranog kompenzovanog signala induktivnog senzora, koja je očigledno vrlo bliska pravoj liniji (greška je značajno ispod jednog mikrometra). Neselektivnost postupka u

smislu razlikovanja komponente električnog od mehaničkog radijalnog udara je očekivana, jer se radi o dva vrlo slična sadržaja koje je objektivno teško razlikovati. Obe komponente su stacionarne u ugaonom domenu predstavljanja signala induktivnog senzora pa se i po tom osnovu ne mogu razlikovati. Ovaj očigledni nedostatak razvijene metode stvara jednu korisnu mogućnost: nivo dekompozicije signala induktivnog senzora treba izabrati tako da se postigne željena podudarnost signala laserskog senzora i signala kompenzovanog induktivnog senzora. Po ovom kriterijumu šesti nivo aproksimacije je adekvatan.

Nedostatak razvijene metode se može prevazići upotrebom statičke kompenzacione tabele u kojoj se čuvaju vrednosti mehaničkog radijalnog udara mernog valjka. Poremećaj ovog tipa je stacionaran i u konkretnom slučaju laserske merne stanice jednostavno se može identifikovati i memorisati. Umesto nepouzdanih kompenzacionih tabela u kojima se čuva informacija električnog radijalnog udara, treba čuvati informacije o mehaničkom radijalnom udaru, odnosno čisto geometrijskoj informaciji o odstupanja od cilindričnosti i saosnosti mernog valjka.

5. ZAKLJUČAK

U radu je izložen postupak dinamičkog kompenzovanja greške induktivnog senzora izazvane anizotropnim elektromagnetskim svojstvima nestacionarne feromagnetne mete. Dekompozicijom signala na faznokorektno komponente i uklanjanjem komponente bazne linije koja u najvećoj meri odgovara poremećaju koje izaziva slektromagnetska anizotropnost problem se može efikasno rešiti. Postupak je dinamički jer on uvek uklanja komponentu bazne linije bez obzira na njen trenutni oblik. Razvijena metoda poseduje nesavršenost koja se sastoji u tome da se istovremeno uklanja i komponenta mehaničkog radijalnog udara. Ovaj nedostatak se može efikasno otkloniti primenom statičkih kompenzacionih tabela.

Reference:

- [1] G.Y. Tian, Z.X. Zhao, R.W. Baines and P. Corcoran, Blind Sensing, IEE Manufacturing Engineer, pp. 179-182, Aug. 1997.
- [2] D. H. Biggs, Method for Removing Electrical Runout in Machine Shafts and Apparatus for Use With the Same, US Patent 3,986,380, 1976.
- [3] J. Surutka, *Elektromagnetika*, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1971.
- [4] K. H. J. Buschow and F. R. de Boer, 2004, *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*, Kluwer Academic Publishers, NY, ISBN: 0-306-47421-2, 2004.
- [5] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, CBMS-NSF Regional Conf. Ser. in Appl. Math., vol. 61, SIAM, Philadelphia, 1992.
- [6] Mallat, S., G., A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol II, No. 7, pp. 674-693, July 1989.
- [7] Daubechies, I., The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.36, No.5, pp.961-1004, September 1990
- [8] F.T. Chau, Y.Z. Liang, J. Gao and X.G. Shao, *Chemometrics - From Basics to Wavelet Transform*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN 0-471-20242-8, 2004.

Dynamic Compensation of Electrical Runout in Eddy Current Contactless Measurements of Non-Stationary Ferromagnetic Target

Abstract

Modern industrial measuring systems are frequently based on eddy current sensors. These sensors are highly accurate, resolute, has good bandwidth and they are very robust in sense of contamination in industrial working environment. Major drawback of this technology is sensitivity of eddy current sensors to electromagnetic anisotropy of target material. This problem become critical in non stationary target applications, where measuring location is normally moving in the plane orthogonal to the sensor main axis. Compensation of induced error by lookup table is impractical due to non stationarity of electromagnetic properties of target material. The other possibility is to smooth electromagnetic anisotropy by mechanical alteration of target surface. Unfortunately, this approach is very delicate and frequently lead to deterioration of initial situation. In this paper is presented radically new approach which is based on multiresolution signal decomposition using DWT, recognition the component which is generated by electromagnetic anisotropy, and removing this component from eddy current sensor readings. This approach is dynamical in its essence and therefore it is capable to handle non stationary properties of electromagnetic anisotropy. The proposed method is experimentally. Achieved results show it s applicability in real industrial conditions.