

# Nadzor senzorske opreme stroja za hladno valjanje s spremljanjem masnega pretoka

Dejan Gradišar<sup>1</sup>, Miha Glavan<sup>1</sup>, Gregor Dolanc<sup>1</sup>, Mojca Lončnar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Jožef Stefan,  
Jamova 39, 1000 Ljubljana,

[dejan.gradisar@ijs.si](mailto:dejan.gradisar@ijs.si),  
[miha.glavan@ijs.si](mailto:miha.glavan@ijs.si),  
[gregor.dolanc@ijs.si](mailto:gregor.dolanc@ijs.si)

<sup>2</sup>SIJ Acroni,  
Cesta Borisa Kidriča 44, 4270 Jesenice

[mojca.loncnar@acroni.si](mailto:mojca.loncnar@acroni.si)

## *Monitoring of sensor equipment of a cold rolling mill based on mass flow evaluation*

The metal industry is subject to high standards that ensure the production of quality products in a cost-effective way. Even minor failures in production equipment can affect the quality and cause large economic losses. Effective on-line equipment monitoring helps to quickly detect deviations from normal operation and potential failures, and thus reducing the risks of an uncontrolled drop in the quality of finished products. In this paper, we deal with the control of the sensor equipment of the cold rolling machine (ZRM) at SIJ Acroni. By rolling, the metal sheet is deformed so as to change the cross-sectional shape, i.e. the thickness of the metal sheet is reduced and flattened. With a simple mass flow model, we can control a sensor system for measuring thickness (X-ray) and speed. The solution is based on following the assumption of mass equilibrium before and after the rolling. The inlet and outlet mass of the metal sheets are calculated on-line through measurements obtained with the existing sensor equipment. Their sudden mismatch indicates a fault, which must be addressed.

## *Kratek pregled prispevka*

Jeklarska industrija je podvržena visokim standardom pri zagotavljanju kvalitetnih izdelkov na stroškovno učinkovit način. Že manjše okvare na proizvodni opremi lahko pomembno vplivajo na kvaliteto in posledično povzročijo velike ekonomske izgube. Učinkovit sproti nadzor opreme pomaga pri hitrem odkrivanju odstopanj od normalnega obratovanja ter potencialnih okvar in s tem zmanjšuje tveganja za nenadzorovan padec kvalitete končnih izdelkov. V prispevku proučujemo nadzor senzorske opreme stroja za hladno valjanje pločevine (ZRM) v podjetju SIJ Acroni. Z valjanjem se pločevina preoblikuje, tako da se spremeni oblika prečnega prereza, t.j. debelina pločevine se zmanjša in se splošči. Z enostavnim modelom masnega pretoka lahko nadziramo senzorski sistem za merjenje debeline (rentgenski merilnik) in hitrosti. Rešitev temelji na sprotne sledenju predpostavke o ohranitvi mase pred in po valjanju. Vstopno in izstopno maso pločevine sproti izračunavamo preko meritev, ki jih dobimo preko obstoječe senzorske opreme. Njun nenaden odklon kaže na napake, katerim se je potrebno posvetiti.

## 1 Uvod

Stroj za hladno valjanje pločevine (*Cold rolling mill*) je integralni del jeklarskega proizvodnega procesa. Z valjanjem se pločevina plastično preoblikuje, tako da se spremeni oblika prečnega prereza. Pri tem je potrebno zagotoviti, da je končni izdelek v sprejemljivih tolerancah debeline in ravnosti. Ker se od proizvajalcev zahteva vedno bolj raznolike in kakovostne izdelke, s strogimi tolerančnimi zahtevami, le-ti iščejo rešitve za učinkovit nadzor in optimizacijo proizvodnega procesa.

Življenjska doba opreme v jeklarski industriji je običajno daljša, kot v drugih proizvodnih sektorjih. Kar pa ne pomeni, da te opreme ni potrebno vzdrževati in jo posodabljeti. Pri investicijah je potrebno oceniti smotnost posodabljanja obstoječe opreme ali se odločiti za nakup nove opreme. Čeprav malo z zamikom glede na druge branže, pa se v zadnjem obdobju tudi proizvodni procesi v železarski industriji intenzivno digitalizirajo. To ponuja veliko možnosti za iskanje novih procesnih izboljšav [4]. Z nadgradnjo avtomatike in senzorike, ter njihovo integracijo v celovit informacijski sistem imamo na voljo veliko količino proizvodnih podatkov, katere je mogoče uporabiti za boljši nadzor nad opremo in optimizacijo proizvodne učinkovitosti.

V prispevku se osredotočamo na nadzor senzorske opreme stroja za hladno valjanje pločevine, ki se v podjetju SIJ Acroni uporablja pri izdelavi neorientirane elektro pločevine ter toplo in hladno valjanih trakov iz specialnih jekel. V primeru, ko imamo na voljo več merjenih procesnih parametrov, lahko le-te izrabljamo za sprotno validacijo podatkov preko upoštevanja temeljnjih fizikalnih zakonitosti obravnavanega procesa. V članku predstavljena rešitev temelji na temeljni predpostavki ohranitve masne bilance, ki predpostavlja, da se masa materiala pred in po valjanju ohranja. Vstopno in izstopno maso pločevine lahko izračunavamo preko meritev posodobljene senzorske opreme. Nenaden odklon pričakovanih relacij med meritvami nakazuje deviacijo v delovanju proizvodne opreme in s

tem javi vzdrževalni ekipi zožen nabor možnih napak.

Področje, ki se ukvarja s fizikalnim ozadjem postopka hladnega valjanja ima že dolgo tradicijo in je že dobro raziskano [2][3]. Z vedno boljšo informacijsko podporo proizvodnih linij (številni senzorji in platforme za zbiranje velikih podatkov [5]) se odpirajo nove možnosti za izboljšavo učinkovitosti obratovanja, boljšega nadzora nad opremo in zagotavljanja izdelkov v ožjih tolerancah.

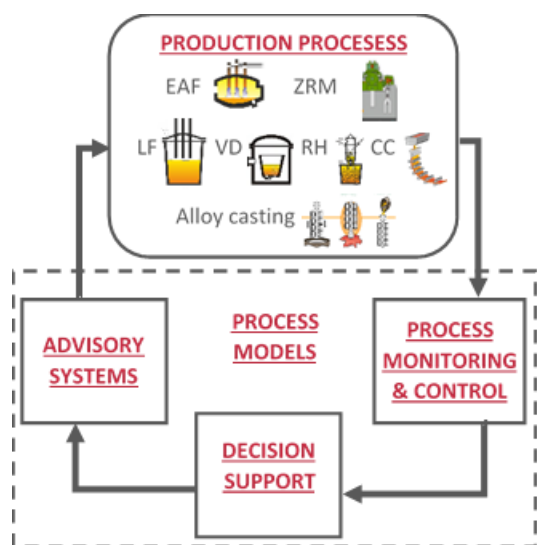
V drugem poglavju je na kratko predstavljen projekt INEVITABLE, v okviru katerega se razvija predstavljena rešitev. V tretjem poglavju so podane osnovne značilnosti stroja za hladno valjanje pločevine in sistem, ki se v okviru projekta razvija, za nadzor njegove opreme. V četrtem so predstavljene osnovne fizikalne zakonitosti masnega pretoka v postopku valjanja, ki jih s pridom izkoriščamo v modelu za ugotavljanje anomalij, kot je to prikazano v petem poglavju. Na koncu so podani še zaključki.

## 2 Projekt INEVITABLE

Predstavljeno delo predstavlja enega izmed obravnavanih problemov v okviru mednarodnega projekta INEVITABLE [1], katerega cilj je optimizacija in izboljševanje proizvodnih procesov z digitalnimi tehnologijami. V okviru projekta so obravnavani proizvodni procesi jeklarske industrije ter industrije barvnih kovin. Obravnavani proizvodni obrati se nahajajo v Sloveniji (SIJ Acroni), Avstriji (voestalpine) in Španiji (Sidenor in EIPC) in zajemajo primarne in sekundarne metalurške procese, kot tudi ulivanje barvnih kovin ter hladno valjanje pločevine. Industrijske partnerje v raziskovalnih aktivnostih podpirajo institucije specializirane za metalurške tehnologije (BFI, K1-MET, Azterlan) in institucije specializirane za avtomatizacijo in procesno vodenje (Siemens, Fakulteta za Elektrotehniko – UL, Univerza KTH, Institut Jožef Stefan in Compureg).

Aktivnosti na projektu se osredotočajo na razvoj višje-nivojskih nadzornih sistemov, ki bodo pripravljene za različne proizvodne obrate

in demonstrirani v operativnem okolju (TRL 7). Nadzorni sistemi bodo temeljili na vgrajenem kognitivnem znanju, ki bo omogočal avtonomno delovanje procesov. Uspešnost vpeljanih tehnologij se spremlja preko vpeljanih kazalnikov učinkovitosti (poraba virov, kvaliteta izdelkov...), ki bodo spremljali dosežene učinke razvitih rešitev. Na podlagi tega je predvidena popolna digitalna preobrazba demonstracijskih mest v obratih, vključno z digitalno posodobitvijo opreme, zajemom, shranjevanjem, obdelavo in analitiko podatkovnih tokov, nadgradnja komunikacije in avtomatizacije, ter na koncu tudi standardizacija ustreznih podatkovnih vmesnikov. V kombinaciji s podatki iz pametnih senzorjev in omrežnih senzorskih sistemov, bodo razviti različni prediktivni modeli, s katerimi bo mogoče preučevati vpliv procesnih parametrov na končno kvaliteto proizvedenih izdelkov. Osnovni koncept projekta prikazuje Slika 1.

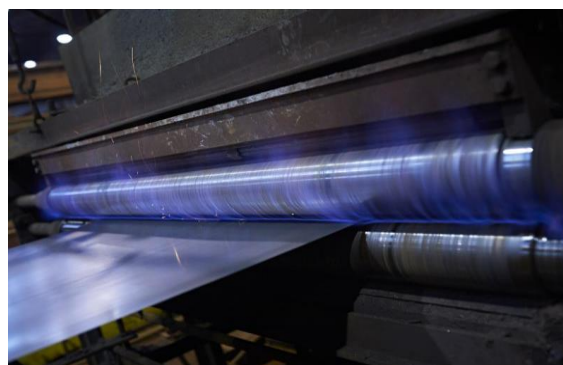


Slika 1: Ideja projekta INEVITABLE.

S pomočjo rezultatov projekta INEVITABLE bomo izboljšali zmogljivost in zanesljivost obstoječih sistemov vodenja procesov in s tem zagotavljali učinkovitejšo proizvodnjo in boljše lastnosti končnih izdelkov. Poleg tega se pričakuje zmanjšanje porabe proizvodnih virov in emisij toplogrednih plinov (CO<sub>2</sub>). Vse to bo prispevalo k bolj konkurenčni in trajnostni metalurški industriji v EU.

### 3 Sistem za nadzor opreme stroja za hladno valjanje pločevine

Ena izmed aktivnosti projekta je razvoj sistema za spremljanja stanja, diagnostiko in optimizacijo delovanja stroja za hladno valjanje. Obravnavan je valjavski stroj tipa Sendzimir (ZRM), ki se uporablja za hladno valjanje pločevine v podjetju SIJ Acroni (Slika 2). Nadzorni sistem procesa, ki se razvija v okviru projekta, bo temeljil na digitalnem dvojčku procesa, s pomočjo katerega bo mogoče prilagajati recepte za valjanje, izvajati nadzor nad stanjem opreme ter zaznavati anomalije v izvajanju valjanja.



Slika 2: Hladno valjanje pločevine.

Valjanje je preoblikovalni postopek, pri katerem se materialu spremeni oblika prečnega prereza zaradi tlaka, s katerim vrteča valja delujeta na premikajoči material. Obravnavan sistem se uporablja za tanjšanje debeline pločevin in njeno ravnost.

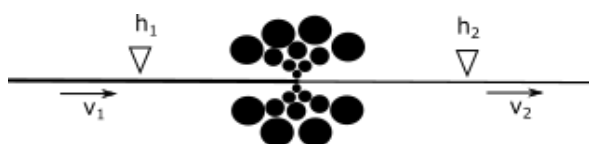
Predpogoj za izvedbo optimizacije delovanja procesa ZRM, je bila njegova modernizacija in digitalna posodobitev, ki sedaj omogoča spremljanje več kot 700 procesnih spremenljivk. Na podlagi tega se razvijajo fizikalni in matematični modeli (digitalni dvojček), s katerimi bo mogoče spremljati delovanje procesa in opreme ter sklepati na odstopanja v delovanju.

Sistem za spremljanje in diagnostiko opreme valjavskega stroja se bo osredotočal na nadzor delovanja različnih DC motorjev, nadzor nad regulacijskimi zankami in opremo za hidravlično stiskanje pločevine, kot tudi nadzor nad delovanjem senzorske opreme. Slednje je tudi fokus tega prispevka. Osnovni cilj je postavitev

koncepta, ki bo omogočal zaznavo in identifikacijo virov napak. Pri tem se izkorišča dejstvo, da je na razpolago veliko število procesnih meritev, ki so med seboj fizikalno povezane, kot tudi, da imamo na razpolago več redundantnih meritev. S sprotnim preverjanjem in vrednotenjem razpoložljivih meritev, sistem zaznava odklon od pričakovanih relacij med meritvami ter posledično indicira na morebitne napake na opremi. S tem bo mogoče hitreje zaznati deviacijo v delovanju opreme, ker imamo na voljo meritve za več različnih parametrov, pa je v določenih primerih vir napake mogoče tudi bolj natančno locirati.

#### 4 Masni pretok v postopku valjanja

Osnovne razmere v postopku hladnega valjanja povzema slika 3.



Slika 3: Merjenje hitrosti in debeline.

Med valjanjem se spreminja debelina valjane pločevine, njena gostota in masa pa ostajata konstantni. Za obravnavan primer velja tudi, da se material med valjanjem preoblikuje le v smeri gibanja materiala (smer dolžine), sprememba širine pločevine pa je zanemarljivo majhna. Tako lahko sklepamo, da se s spremembo debeline pločevine spremeni le hitrost gibanja obdelovanca. Ob upoštevanju tega, pridemo do povezave med vhodno  $v_{in}$  in izhodno hitrostjo  $v_{out}$  (1).

$$\begin{aligned}
 m_{in} &= m_{out} \\
 \rho \cdot V_{in} &= \rho \cdot V_{out} \\
 \rho \cdot d \cdot l_{in} \cdot h_{in} &= \rho \cdot d \cdot l_{out} \cdot h_{out} \\
 v_{in} \cdot t \cdot h_{in} &= v_{out} \cdot t \cdot h_{out} \\
 v_{out} &= v_{in} \cdot \frac{h_{in}}{h_{out}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Vidimo, da je razmerje med vhodno in izhodno hitrostjo odvisno le od razmerja vhodnih ( $h_{in}$ ) in izhodnih debelin ( $h_{out}$ ). V primeru, da je stroj za hladno valjanje opremljen s senzorji, ki merijo vse veličine, lahko to s pridom

izkoriščamo za nadzor in sprotno ugotavljamo ali je prišlo do napake na katerem od senzorjev.

V obravnavanem proizvodnem procesu se hitrost premikanja pločevine meri preko dveh različnih merilnih postopkov. S prvim načinom je hitrost določena računsko na podlagi meritev digitalnega enkoderja (meritev kota odmika na osi motorja, ki poganja odvijalnik in navijalnik in ocene debeline pločevine in število plasti navitja, na podlagi katerih določimo radij navitja) –  $v_{TR}$ . Drug način merjenja hitrosti, pa izkorišča merjenje hitrosti valjčkov, ki skrbijo za pravilno pozicioniranje pločevine –  $v_{Roll}$ . Nobeden od postopkov ni idealen, in nam ne zagotavlja povsem natančne meritve v celotnem področju delovanja. Prvi način je odvisen od natančnosti ocene debeline in napetostjo pod katero je bila pločevina navita. V drugem pa lahko pride do spodsavanja na stiku valjčkov in pločevine, predvsem ob pospeševanju oz. pojemanju hitrosti. Vseeno pa nam dejstvo, da merimo različne parametre na več načinov, ponuja dodatne možnosti nadzora nad delovanjem opreme.

Na način kot to nakazuje (1) lahko nadzor delovanja sistema in senzorskih sistemov izvajamo preko spremljanja vhodnih in izhodnih masnih pretokov. Te lahko ocenjujemo na več načinov. Ob predpostavki, da se njena gostota ( $\rho$ ) ne spreminja, se lahko posvetimo le analizi vhodno-izhodnih volumnov. Vhodni in izhodni volumen izračunavamo na več načinov, ki temeljijo na uporabi različnih razpoložljivih merjenih parametrov:

- Izračun volumna  $V$  preko integracije hitrosti  $v$  in debeline pločevine  $h$ .

$$V_{vh} = d \cdot \int v(t) \cdot h(t) \cdot dt \quad (2)$$

- Izračun volumna  $V$  z upoštevanjem dolžine obdelane pločevine  $L$  in povprečno debelino pločevine  $\bar{h}$ .

$$V_{Lh} = d \cdot L \cdot \bar{h} \quad (3)$$

- Izračun volumna  $V$  glede na povprečno hitrost pločevine  $\bar{v}$ , pretečeni čas  $T$  in povprečno debelino pločevine  $\bar{h}$ .

$$V_{vTh} = d \cdot \bar{v} \cdot \bar{h} \cdot T \quad (4)$$

Z valjanjem ostaja konstantna tudi širina pločevine ( $d$ ), tako jo lahko pri izračunu vhodno izhodne relacije izpustimo.

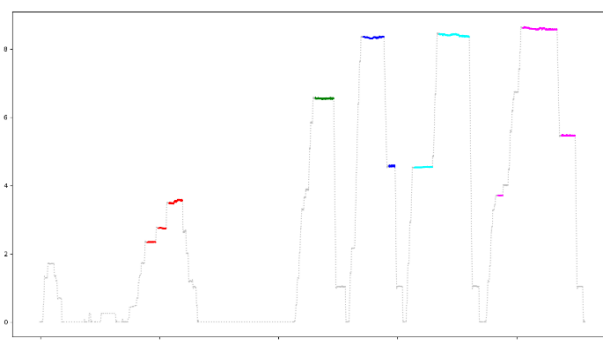
## 5 Model za ugotavljanje anomalij

Da bi bile fizikalne relacije uporabne za zaznavanje anomalij in njihovo lokalizacijo, moramo tako najprej ugotoviti kako se proizvodni sistem obnaša v obratovanju, ko ni prisotnih napak. V ta namen smo izvedli analizo merjenih signalov in preverili obnašanje veličin, ki jih dobimo preko relacij definiranih v prejšnjem poglavju.

### 5.1 Priprava podatkov

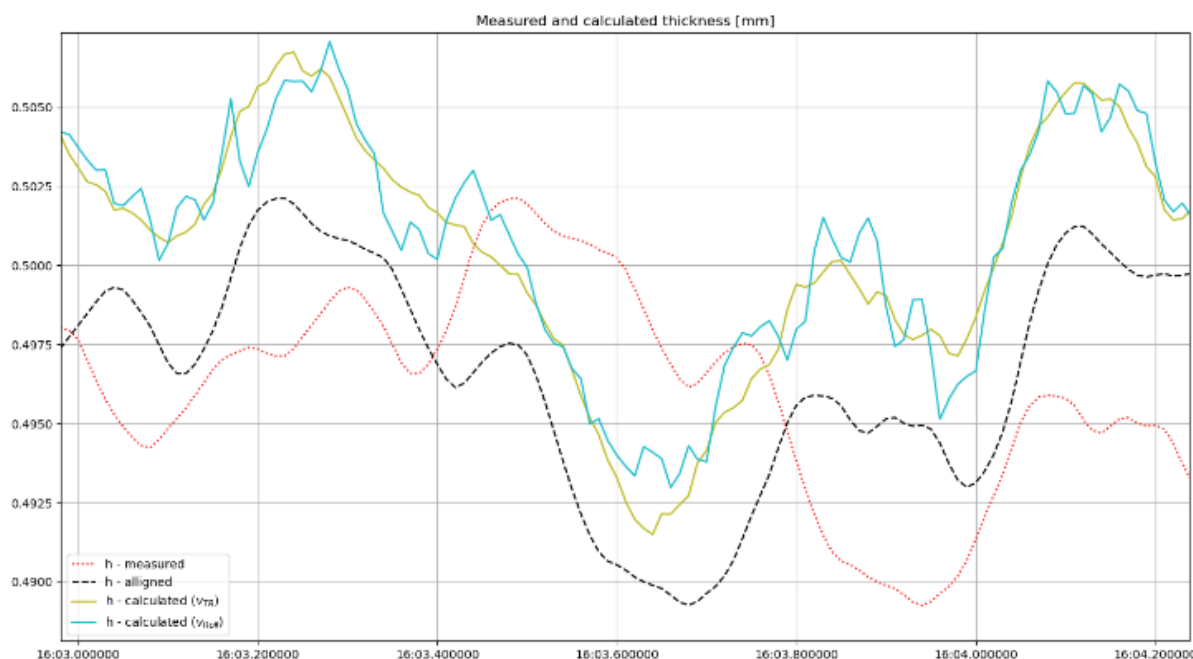
Na voljo smo imeli meritve procesnih veličin za več sto navitij in za dva tipa izdelkov, ki se obdelujejo na tem stroju. Vse te meritve pa niso uporabne za našo analizo, saj zajemajo tudi navitja, ki so bila obdelana po nestandardnem postopku, ki onemogoča avtomatsko analizo. V prvi fazi analize smo zato preverili ustreznost podatkov in izločili neustrezne. Končni set podatkov je zajemal 286 navitij izdelka A in 166 navitij izdelka B.

Do zelene debeline navitja se pride postopno, tako se navitje pelje čez postopek valjanja večkrat (za obravnavane izdelke običajno petkrat). Da smo se lahko osredotočili na analizo le optimalnega obratovanja (brez prisotnih napak), smo obravnavali podatke le iz stacionarnega delovanja, t.j. ko je hitrost valjanja nespremenljiva. Poleg tega smo izločili tudi podatke, ki so zajeti ob nizkih hitrostih, saj razmere takrat niso povsem reprezentativne.

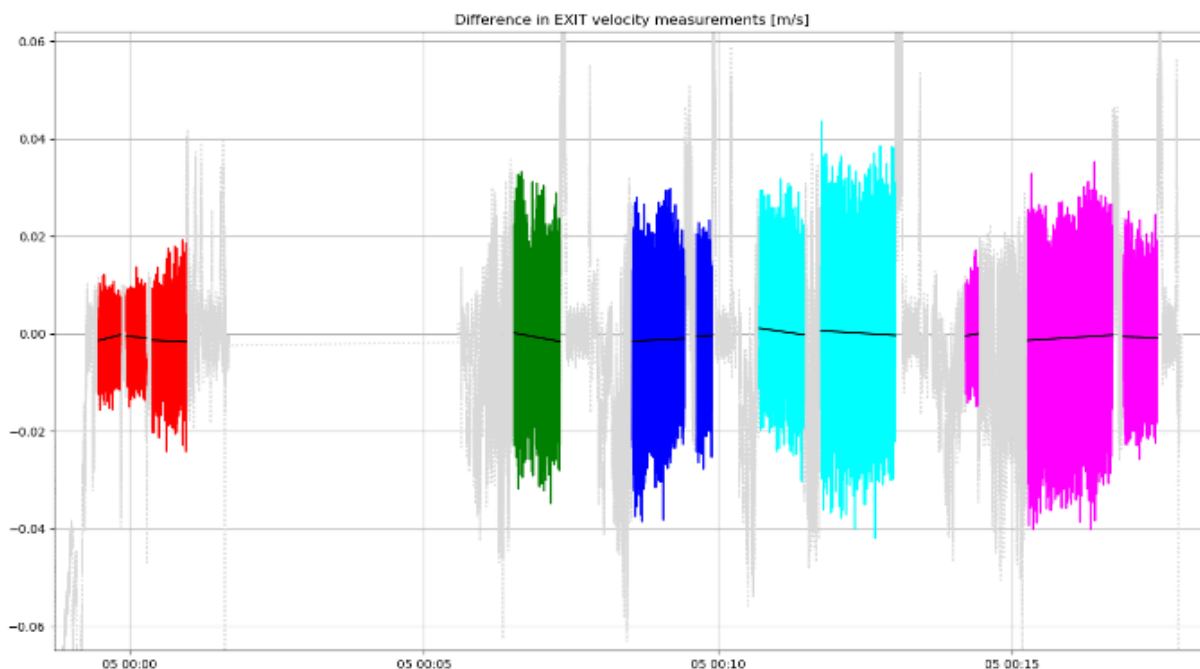


Slika 5: Časovni profil hitrosti premikanja traku.

Na sliki 5 je prikazan primer časovnega profila hitrosti, kjer je bilo eno navitje obdelano s petimi zaporednimi prevleki. Z odebeljenimi



Slika 4: Prikaz časovnega poteka merjenja debeline. Opazi se razlika med merjenimi in izračunanimi vrednostmi.



Slika 6: Razlika merjenih signalov hitrosti.

oznakami pa je označeno stacionarno področje, ki je predstavljalo osnovo za nadaljnjo analizo.

Kot lahko opazimo iz slike 3, so senzori za merjenje debeline nekoliko zamaknjeni od pozicije valjanja. To rezultira v časovnem zamiku meritev, ki jih je potrebno kompenzirati. V ta namen smo vse meritve debeline preračunanali na pozicijo valjanja. Izsek poteka merjenega (rdeča) in zamaknjenega (črna) signala meritve izhodne debeline je prikazan na sliki 6. Poleg tega na sliki prikazujemo tudi izračunane signale, ki jih izračunamo preko naslednje relacije:

$$h_{\text{out}} = h_{\text{in}} \cdot \frac{v_{\text{in}}}{v_{\text{out}}} \quad (5)$$

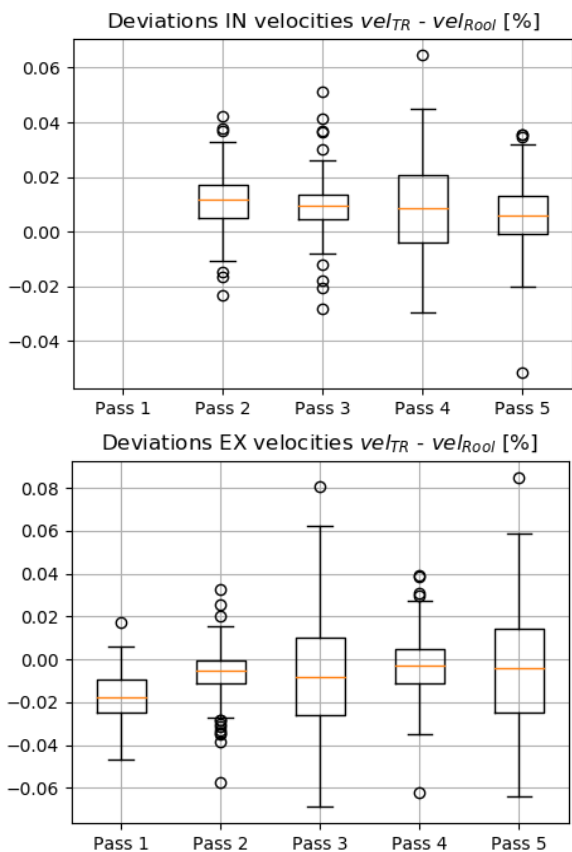
Glede na to, da imamo na voljo dve meritvi hitrosti, lahko debelino izračunavamo na dva načina. Na sliki 6 je z zeleno barvo označen signal debeline, ki je izračunan iz  $v_{TR}$ , z rumeno pa iz  $v_{Roll}$ . Kot vidimo, oba izračunana signala od merjenega in poravnane signala odstopata z neko konstantno vrednostjo, kar nakazuje na sistemsko mersko napako.

## 5.2 Nadzor merjenja hitrosti pločevine

Odstopanje, ki se kaže med merjenimi in izračunanimi vrednostmi (slika 6), je lahko posledica napačnega merjenja hitrosti ali debeline. Ker imamo na voljo dve meritvi hitrosti, se v prvem koraku osredotočimo na primerjavo le-teh. Slika 6 prikazuje razliko obeh meritev hitrosti za pet prevlekov enega navitja pločevine v odvisnosti od časa. Vidimo, da se vrednosti med seboj zanemarljivo razlikujejo. Opaziti je sicer mogoče majhen trend, ki se pojavlja v njuni razliki, kar bi lahko bila posledica napačnega ocenjevanja premera navitja, ki se uporablja za določitev hitrosti  $v_{TR}$ .

Da potrdimo zadostno ujemanje obeh meritev hitrosti se v nadaljevanju osredotočamo na analizo nad podatki večih navitij. Za vsako navitje smo določili njihovo povprečno hitrost preko stacionarnega obratovanja. Na sliki 7 so prikazana odstopanja za vsak prevlek posebej, tako za vhodno (zgoraj) kot izhodno stran (spodaj). Manjka sicer primerjava za prvi prevlek na vhodni strani, saj za ta primer nimamo na voljo vseh meritev. Vidimo, da odstopanja ne presegajo 0,2%, kar potrjuje, da ne prihaja do napak pri merjenju hitrosti.

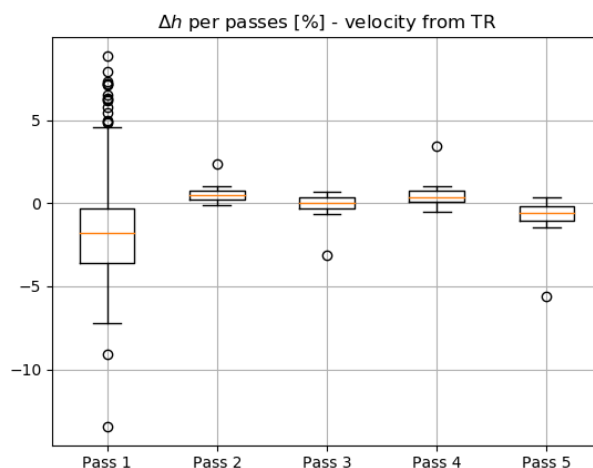




Slika 7: Razlika povprečnih vrednosti merjenih signalov hitrosti.

### 5.3 Nadzor merjenja debeline pločevine

Natančnost meritev hitrosti nakazuje, da do odstopanja masnega pretoka prihaja zaradi odstopanja meritev vhodne in izhodne debeline. V nadaljnji analizi smo nad množico navitij preverili še kako se obnaša razlika povprečnih vrednosti med merjeno in izračunano debelino za posamezen prevlek. Glede na to, da imamo na razpolago dva različna načina merjenja hitrosti, lahko merjeno debelino primerjamo z dvema izračunanima signaloma. Na sliki 8 lahko opazujemo povprečna odstopanja izračunanih vrednosti debeline od merjene za primer, ko debelino izračunavamo preko  $v_{TR}$ .



Slika 8: Povprečne vrednosti razlik med merjeno in izračunano vrednostjo debeline.

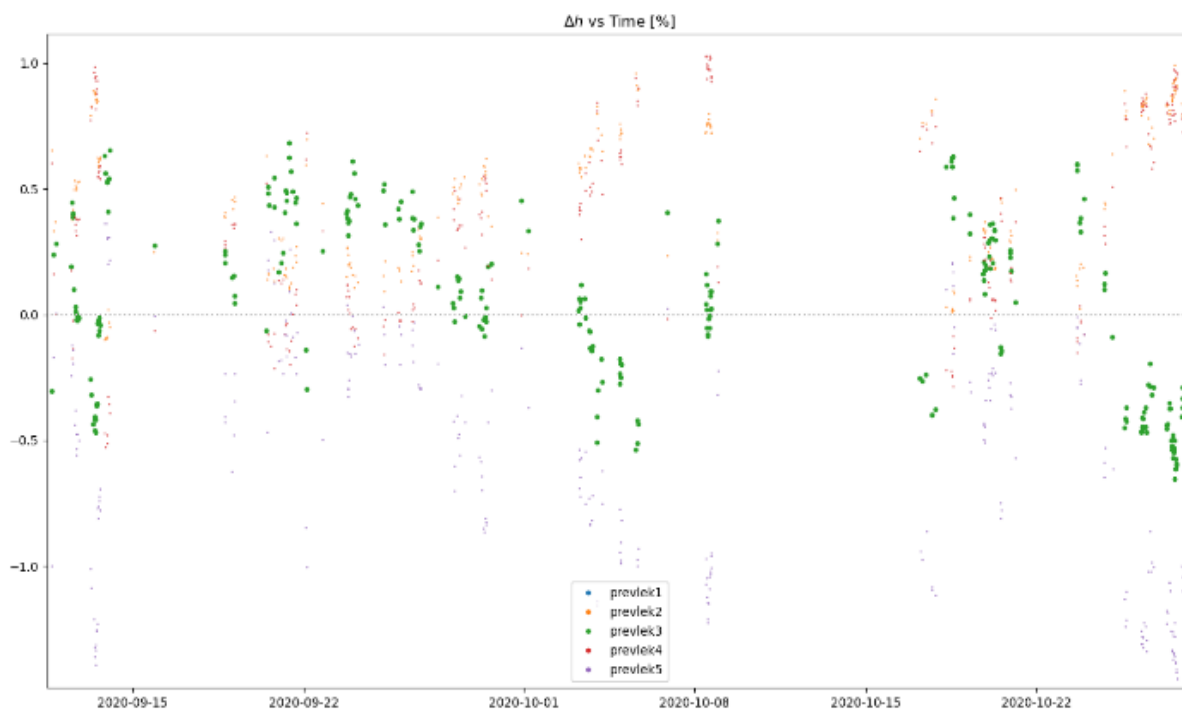
Opazujemo tudi trend deviacije natančnosti meritev debeline preko daljšega časovnega obdobja, kjer opazimo, da imajo navitja, ki so bila obdelovana časovno blizu, podobna odstopanja (Slika 9). Čez daljše časovno obdobje pa lahko zaznamo določena nihanja v natančnosti meritev debeline. Razlog za takšna nihanja bi lahko bila neustrezna nastavitve parametrov senzorjev, ki morajo biti umerjeni glede na lastnosti materiala.

### 5.4 Nadzor preko spremljanja pretečenega volumna

Pravilnost zajemanja meritev lahko preverjamo še s primerjanjem vhodnega in izhodnega volumna. Glede na razpoložljive meritve lahko uporabljamo različne postopke izračunov volumna. Volumen lahko določamo na preko integracije hitrosti  $v$  in debeline pločevine  $h$  (en 2), preko dolžino obdelane pločevine  $L$  in povprečno debelino pločevine  $\bar{h}$  (en 3) in povprečno hitrost pločevine  $\bar{v}$ , pretečeni čas  $T$  ter povprečno debelino pločevine  $\bar{h}$  (en 4).

Za obravnavan problem, ko ni prisotnih večjih odstopanj v merjenju in obdelovalni stroj deluje brez napak, lahko tudi s tako analizo potrdimo do sedaj potrjene ugotovitve. Večjih odstopanj ni prisotnih. Opazimo lahko določena manjša nihanja, ki se pojavljajo podoben način, kot je bilo to zaznano že z predhodno analizo.

Lahko pa nam tak način služi za dodatno preverjanje merjenja posameznih parametrov. V



Slika 9: Odstopanja izračunane od merjene debeline (tretji prevlek).

primeru, da se odstopanje pojavi le pri enem izračunu, lahko takoj ugotovimo izvor napake.

## 6 Zaključki

Predstavljen sistem za preverjanje predstavlja osnovo za izvedbo nadzornega sistema.

Iz analize zgodovinskih podatkov lahko vidimo, da so meritve hitrosti zanesljive in ne prihaja do bistvenega nihanja natančnosti. Določena odstopanja in nihanja je bilo zaznati pri merjenju vhodne in/ali izhodne debeline pločevine. Eden izmed možnih razlogov za odstopanje so neustrezne nastavitve senzorjev, kar bo predmet nadaljnje analize.

Razviti model bo v naslednjem koraku dopolnjen še s sistemom za zaznavanje lezenja zaznanega odstopanja. Na ta način bo mogoče spremljati in zaznavati večja in dolgoročna lezenja odstopanja natančnosti meritev vhodno/izhodne debeline. Ob primeru znatne spremembe natančnosti meritev bo to alarm za bolj podroben pregled in umeritev merilne opreme.

## Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru mednarodnega projekta INEVITABLE (»Optimization and performance improving in metal industry by digital technologies«) (GA No. 869815), ki je sofinanciran s strani Evropske komisije v okviru programa Obzorja 2020, SPIRE in v sklopu nacionalnega raziskovalnega programa Sistemi in vodenje, P2-0001.

## 7 Literatura

- [1] Inevitable, <http://inevitable-project.eu/>, 2021.
- [2] A. Bhaduri: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*, Springer Nature, Singapore, 2018, str. 521 – 555.
- [3] F. Golgranc: *PREOBLIKOVANJE 2. Del: Masivno preoblikovanje*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1999, str. 87 – 144.
- [4] L. Mori, T. Saleh, R. Sellschop, M. Van Hoey. "Unlocking the Digital Opportunity in Metals". *Metals and Mining Practice*, McKinsey & Company, Jan. 2018.
- [5] A. Kroll and A. Vollmer, *Industrial IT for cold rolling mills*. ABB Review, 4/2004, pp. 44 – 49.