

OPTIMIRANJE ZGOREVANJA Z OZIROM NA PORAZDELITEV PREMOGOVEGA PRAHU MED ŠOBE GORILNIKOV

Igor KUŠTRIN, Jože LENART, Alojz KOKOVNIK,
Primož GOSTINČAR, Marjan HOČEVAR

POVZETEK

Zgorevanje v vsakem kurišču mora biti podvrženo čim večji optimizaciji zaradi nižanja specifične porabe goriva in omejevanja emisij škodljivih snovi v okolico. Optimiranje zgorevanja premogovega prahu je še posebej kompleksno. Mlini za rjavi premog in lignit so istočasno tudi ventilatorji za pnevmatski transport premogovega prahu do gorilnikov. Vsak mlin dovaja premogov prah dvema, trem ali štirim šobam gorilnika. Zaradi velikih dimenzij in zapletene geometrije mlina s pripadajočimi prahovodnimi kanali ter stohastičnega dogajanja v mlinu je praktično nemogoče vplivati v zadostni meri na porazdelitev premogovega prahu med šobe gorilnikov. Lažje je med šobe porazdeliti zgorevalni zrak skladno s dejansko porazdelitvijo premogovega prahu. Porazdelitev premogovega prahu se ves čas spreminja v odvisnosti od obremenitve dodajalnika, obrabljenosti glavnih delov mlina in lastnosti premoga.

V okviru članka je predstavljena metoda za sprotno spremljanje porazdelitve premogovega prahu v prahovodnih kanalih za ventilatorskimi mlini. Uporabljajo se zaznavala, ki delujejo na principu elektrostatične razelektritve.

ABSTRACT

Any combustion should be optimized as much as possible to reduce specific fuel consumption and emissions of harmful substances to environment. Optimization of pulverized coal combustion is a complex task. Coal mills are also fans for pneumatic transport of coal particles to burners. Every mill supplies coal dust to two, three or four nozzles of the same burner. Due to large dimensions and complex geometry of mill and coal dust ducts and stochastic milling process it is practically impossible to evenly distribute coal dust between burner nozzles. It is easier to distribute combustion air according to actual coal distribution which is constantly changing. Coal distribution is affected by coal-feeder load, wear of main mill components and coal properties.

Paper deals with the method for continuous measurement of coal distribution in coal dust ducts after the mills. Electrostatic discharge sensors are applied.

1. UVOD

Kurjavo na trdna goriva je v primerjavi s kurjavo na tekoča ali plinasta goriva težje optimirati zaradi oteženega natančnega in enakomernega doziranja goriva in s tem povezanega doseganja optimalnega razmernika zraka v območju zgorevanja. Zgorevanje premogovega prahu je sicer do neke mere podobno zgorevanju tekočih goriv npr. mazuta ali kurilnega olja, vendar je zelo odvisno od vrste premoga in na kakšen način se le-ta melje ter transportira v kurišče. Ligniti in rjavi premogi, kakršni se uporabljajo v slovenskih termoelektrarnah, se meljejo in transportirajo do gorilnikov z ventilatorskimi mlini, v katerih se premog melje z razbijanjem z udarnimi ploščami mlina-ventilatorja in z medsebojnim trenjem. Ko postane v tem procesu delec premoga dovolj lahek, ga tok nosilnih plinov odnese iz mlina proti gorilniku. Na svoji poti proti gorilniku gredo delci še skozi prebiralnik, ki naprej spusti le najlažje delce. Premog ni povsem homogena snov. Sestoji iz gorljivih snovi, mineralov in vode. Gorljive snovi in minerali imajo različne specifične teže zato iz mlina proti gorilnikom letijo delci zelo različnih velikosti: od delcev s premerom večjim od 1,0 mm do delcev s premerom manjšim od 0,1 milimetra. Lahko si predstavljamo, da je zgorevanje delcev tako različnih velikosti in sestave zelo različno.

Poleg tega se premogov prah zaradi stohastičnega in burnega dogajanja v ventilatorskem mlinu dokaj neenakomerno porazdeli po izstopnem preseku mlina. Porazdelitev premogovega prahu po preseku prahovodnega kanala se spreminja tudi z obremenitvijo mlina, obrabljenostjo glavnih delov mlina in vrsto ter kvaliteto premoga. Obrabljenost glavnih delov mlina se spreminja počasi in zvezno, lastnosti premoga se spreminjajo z večjo dinamiko, najpogosteje pa se spreminja obremenitev mlina, ki ima tudi največji vpliv na razporeditev premogovega prahu. Ker mlin običajno dovaja premogov prah dvema ali večjemu številu šob gorilnika, neenakomerna porazdelitev premogovega prahu po preseku prahovodnega kanala povzroči, da ne vstopa v kurišče skozi vsako šobo enak masni tok premogovega prahu. Zaradi tega je oteženo tako doziranje zgorevalnega zraka posameznim šobam gorilnika, ki bi zagotavljalo ustrezen razmernik zraka na izstopu iz vsake šobe.

Mnogo strokovnjakov vlaga veliko naporov, da bi ta problem odpravili in ena od metod, ki bi lahko pripomogla k temu, je predstavljena v nadaljevanju.

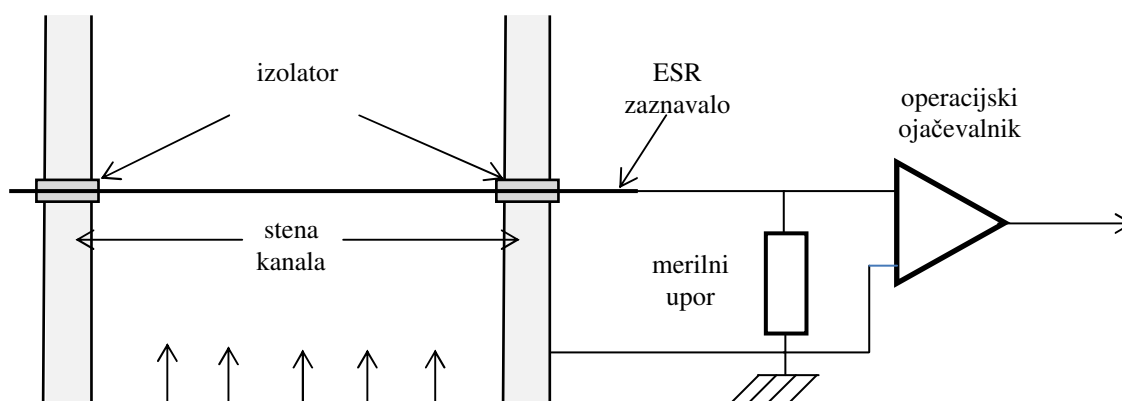
2. TEORETIČNO OZADJE

V literaturi je večkrat obravnavana uporaba zaznaval, ki delujejo na principu elektrostatične razelektritve (ESR) za merjenje porazdelitve, hitrosti in granulacije prašnih delcev v realnem času [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.]. V praksi se na ta način merijo na primer emisije prašnih delcev iz parnih kotlov. Princip delovanja je prikazan na sliki 1.

V prahovodni kanal, katerega stene so izdelane iz električno prevodnega materiala in ozemljene, so vstavljene palice iz prevodnega materiala oziroma ESR zaznavala, ki so

izolirana od sten kanala. Lahko predpostavimo, da je notranjost kanala izolirana od morebitnih zunanjih električnih polj.

ESR zaznavalo je povezano s sistemom za obdelavo signala preko merilnega upora z znano notranjo upornostjo. Ko se na ESR zaznavalu pojavi elektrostatični naboj, steče električni tok s senzorja preko merilnega upora proti ozemljitvi. Merilni sistem pretvori tok v napetostni signal, ki se nato nadalje obdela: filtrira, povpreči, ojača, preračuna, prikaže,... Z ustrezno programsko opremo se da iz signalov ESR zaznaval izračunati povprečno hitrost, profil porazdelitve prahu, hitrostni profil, v nekaterih primerih pa celo kvaliteto mletja.



Slika 1: Merilni princip

Na zaznavalih se zaradi obtekanja električno nabitih delcev nabira električni naboj. Električni naboj je posledica indukcije in neposrednega prenosa naboja z delcev na ESR zaznavalo. Jakost toka je odvisna od električnega naboja delcev, števila delcev in njihove hitrosti. Električni naboj delcev pa je odvisen od samega procesa mletja, velikosti in oblike delcev, intenzivnosti medsebojnih trkov in trkov ob steno kanala, stanja površine kanala in tlaka ter vlažnosti nosilnih plinov. Ker so vsi delci v prahovodnem kanalu izpostavljeni istim prej naštetim vplivom, lahko predpostavimo, da nosijo zelo podobne električne naboje. Lahko tudi predpostavimo, da delci premoga potujejo skozi prahovodni kanal z isto hitrostjo. Jakosti električnih tokov, ki tečejo iz posameznih elektrostatičnih zaznaval skozi merilne upore proti ozemljitvi, se torej med seboj razlikujejo le zaradi različnega števila delcev premogovega prahu, ki jih obtekajo. S primerjavo jakosti električnih tokov izmerjenih na posameznih elektrostatičnih zaznavalih lahko torej ugotovimo relativno porazdelitev premogovega prahu v kanalu.

2.1 Križna korelacija

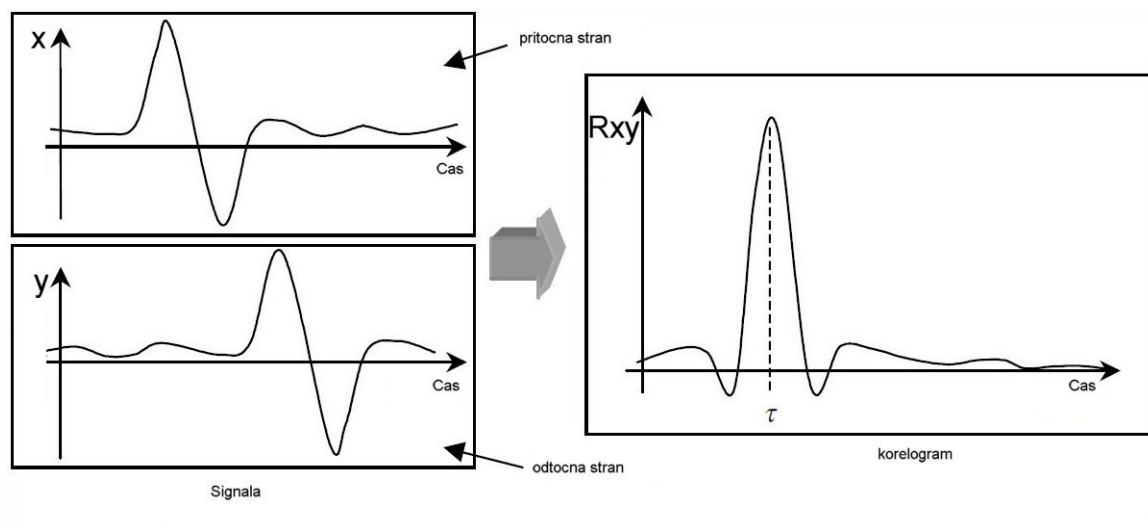
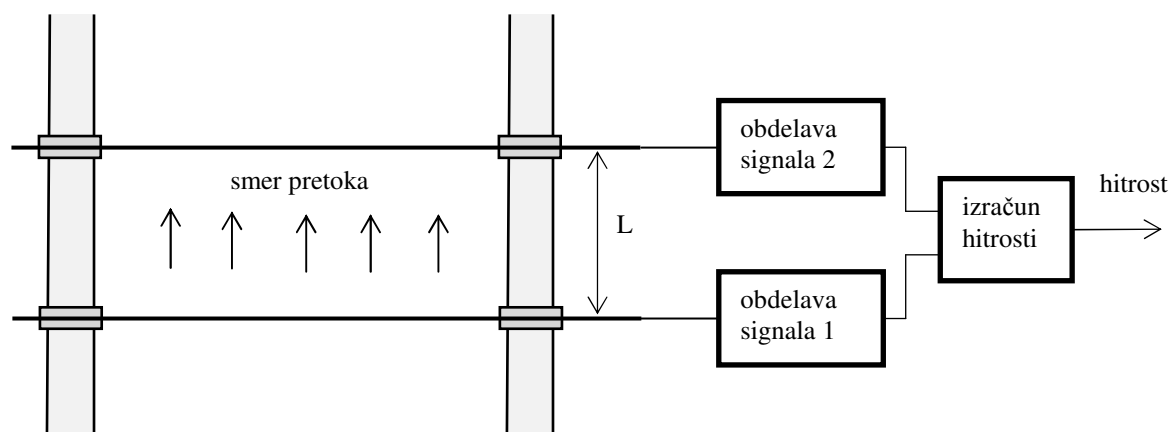
Z uporabo metode križne korelacije signalov dveh ESR zaznaval (slika 2), ki sta nameščeni zaporedno v smeri toka premogovega prahu se da izračunati hitrost premogovega prahu:

$$v = L/\tau \quad (1)$$

Kjer je L razdalja med zaznavali in τ je čas prehoda delcev od enega do drugega zaznavala.

Analogni signali z ESR zaznaval se pretvorijo v diskretne signale pošljejo v računalnik. Za izračun časa prehoda se uporabi spodnja enačba.

$$R_{xy}[\tau] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-\tau] \quad \tau=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2)$$



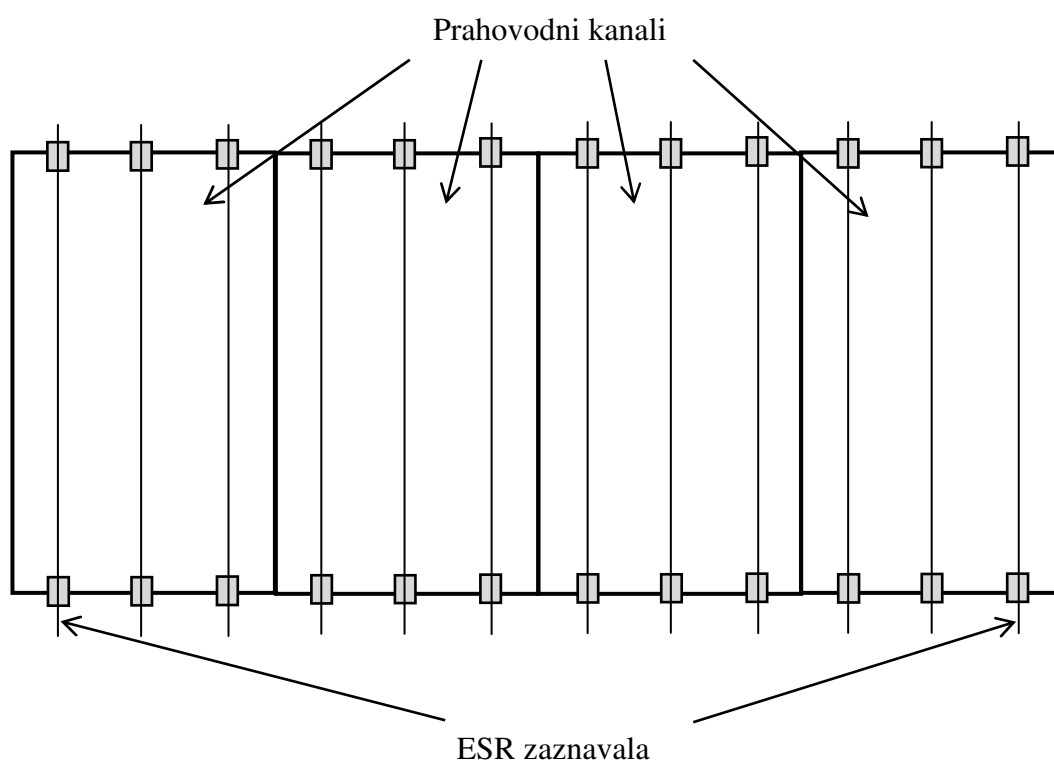
Slika 2: Metoda križne korelacije

Kljub temu, da je osnovni cilj te metode prilagajanje pretoka zgorevalnega zraka razporeditvi premogovega prahu, je v nekaterih primerih koristno poznati tudi dejansko hitrost delcev premogovega prahu v kanalu. Na ta način se da optimirati proces mletja oziroma položaje prebiralnih loput in računsko korigirati vrednosti signalov ESR zaznaval z ozirom na hitrost delcev v kanalu. Že prej je bilo rečeno, da na nivo signala ESR zaznavala poleg števila in naboja delcev vpliva tudi hitrost delcev. Signali ESR zaznaval korigirani

glede na dejansko hitrost so lahko na ta način sorazmerni absolutnemu in ne le relativnemu masnemu toku premogovega prahu.

3. RAZPOREDITEV ZAZNAVAL

Zaznavala morajo biti nameščena tako, da čim bolj natančno zaznajo povprečni masni tok premogovega prahu v prahovodnem kanalu do posamezne šobe gorilnika. Zato je potrebno v vsak kanal vstaviti dve ali tri elektrostatična zaznavala, ki segajo skozi celotno globino prahovodnega kanala, kot je prikazano na sliki 3.



Slika 3: Razporeditev ESR zaznaval v prahovodnih kanalih

V primeru ventilatorskih mlinov je najbolj ustrezno mesto za namestitev zaznaval na ravnem vertikalnem delu prahovodnega kanala med mlinom in gorilnikom, kjer že obstajajo pregrade med prahovodnimi kanali do šob gorilnika.

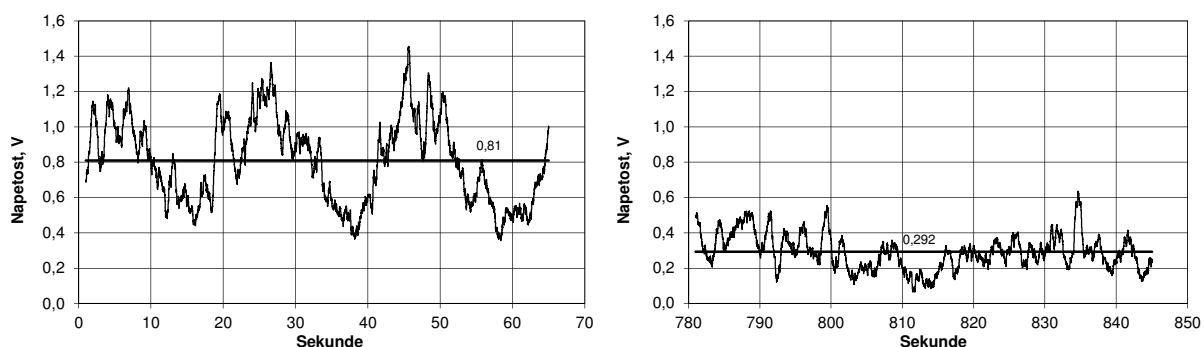
4. REZULTATI POSKUSNIH MERJENJ

Poskusna merjenja z začasno nameščenimi ESR zaznavali so bila izvedena v Termoelektrarni Toplarni Ljubljana (TE-TOL) in Termoelektrarni Šoštanj (TEŠ).

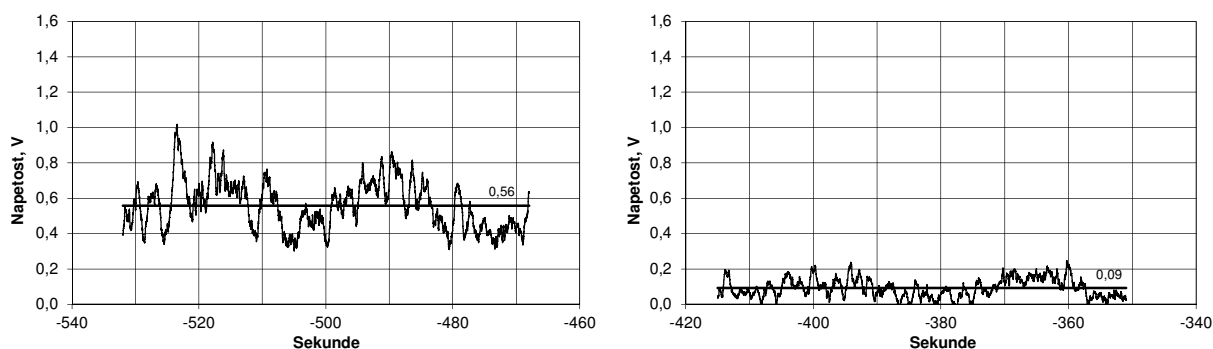
4.1 Občutljivost

V TE-TOL je bila poskusna meritev izvedena z enim samim zaznavalom, ki je bilo vstavljeno v prahovodni kanal enega od mlinov kotla 3. Spreminjala se je obremenitev dodajalnika in globina, do katere je bila potisnjena sonda.

Vsak od diagramov na sliki 4 prikazuje obdobje ene minute. Odčitavalo se je 500-krat na sekundo. V diagrame so vrisana gibajoča povprečja petstotih odčitkov in minutna povprečja. Povprečni nivo signala (padec napetosti na merilnem upor 1 M Ω) je med 0.29 V pri 30 % obremenitvi dodajalnika in 0.81 V pri 60 % obremenitvi dodajalnika. ESR zaznavalo je segalo skozi celotno globino prahovodnega kanala. Vidna so nihanja signala oziroma pretoka premogovega prahu v prahovodnem kanalu zaradi neenakomerne vsipanja premoga v mlin s prečk dodajalnika premoga. Nihanje je očitnejše pri večji obremenitvi dodajalnika. Pri najmanjši obremenitvi dodajalnika je nihanje komaj še opazno, perioda pa je dvakrat daljša zaradi polovične hitrosti dodajalnika. Lahko torej ugotovimo, da je merilna metoda dovolj občutljiva za zaznavanje različnih masnih tokov premogovega prahu.



Slika 4: 60 % in 30 % obremenitev dodajalnika

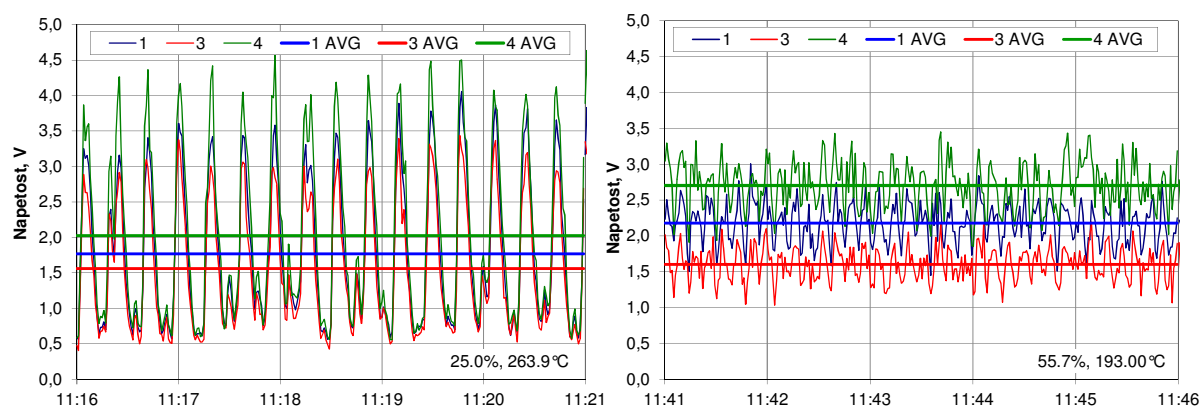


Slika 5: Največja in polovična dolžina zaznavala pri isti obremenitvi dodajalnika

Diagrama na sliki 5 prikazujeta odvisnost velikosti signala od površine ESR zaznavala, ki je v stiku s premogovim prahom. Oba diagrama sta posneta pri isti obremenitvi dodajalnika, le da je v drugem primeru ESR zaznavalo segalo samo do polovice globine prahovodnega

kanala. Signal je v drugem primeru opazno šibkejši. Iz rezultatov tega preizkusa lahko zaključimo, da zaznavalo, ki ima večjo aktivno površino, oddaja močnejši signal.

V TEŠ je bilo za poskusna merjenja v prahovodni kanala enega od mlinov kotla bloka 4 vgrajenih dvanajst zaznaval: po tri zaznavala za vsako od štirih šob gorilnika, kot je prikazano na sliki 3. Slika 6 prikazuje najbolj reprezentativne rezultate merjenj s temi zaznavali. Vsak diagram prikazuje obdobje petih minut za tri šobe. Snemanje signalov zaznaval četrte šobe je bilo onemogočeno zaradi okvare merilne kartice. Po tri ESR zaznavala so bila med seboj vzporedno električno spojena. Frekvenca odčitavanja je bila 500 odčitkov na sekundo. Vrisana so povprečja 500 odčitkov (ena sekunda) in povprečje celotnega obdobja petih minut.

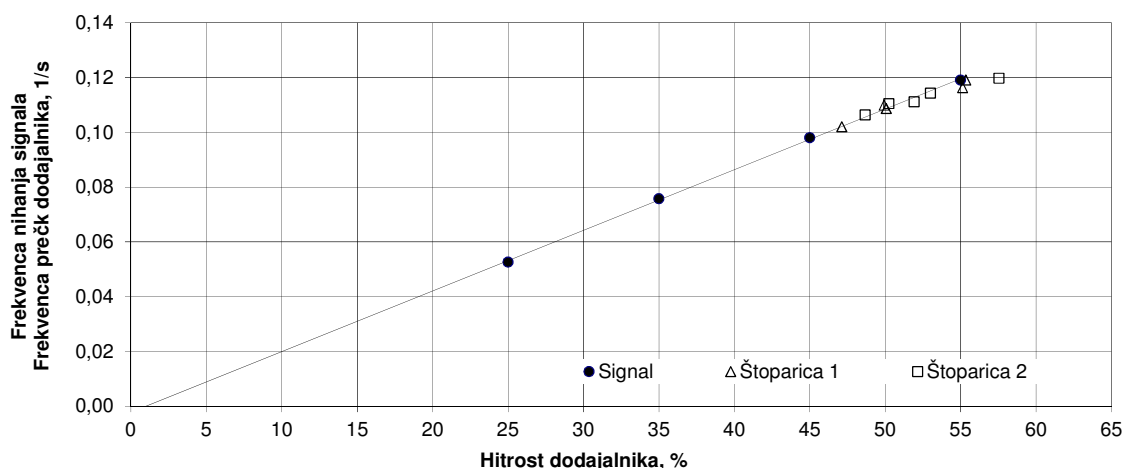


Slika 6: 25,0 % in 55,7 % obremenitev dodajalnika, TEŠ

Nivoji signalov so pri 55,7 % obremenitvi dodajalnika premoga v povprečju višji kot pri 25,0 % obremenitvi. Spremenila so se tudi razmerja med nivoji signalov.

Zelo razvidno je nihanje pretoka premogovega prahu pri manjši obremenitvi dodajalnika. Treba je seveda povedati, da 25 % obremenitev dodajalnika leži pod dopustnim območjem obremenitve dodajalnika, ki znaša med 45 % in 60 %. Pri normalnem obratovanju torej ne prihaja do tako izrazitega nihanja pretoka premogovega prahu, ki bi povzročalo nestabilno zgorevanje.

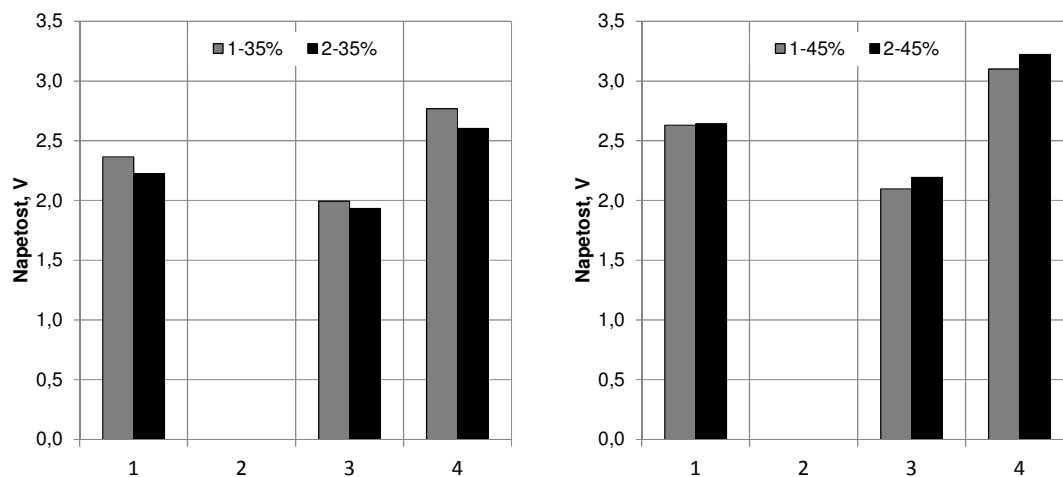
Da bi preverili, ali nihanje signala dejansko odraža nihanje pretoka premogovega prahu, se je s štoparico izmerila frekvenca pojavljanja prečk dodajalnika premoga pri različnih hitrostih dodajalnika. Slika 7 prikazuje s štoparico izmerjeno frekvenco pojavljanja prečk dodajalnika in frekvenco nihanja signala. Frekvenci se povsem ujemata, kar dokazuje, da je nihanje signala dejansko posledica nihanja pretoka premogovega prahu povzročenega z neenakomernim vsipanjem premoga v mlin s prečk dodajalnika.



Slika 7: Frekvenca pojavljanja prečk dodajalnika in frekvenca nihanja signala

4.1.1 Ponovljivost

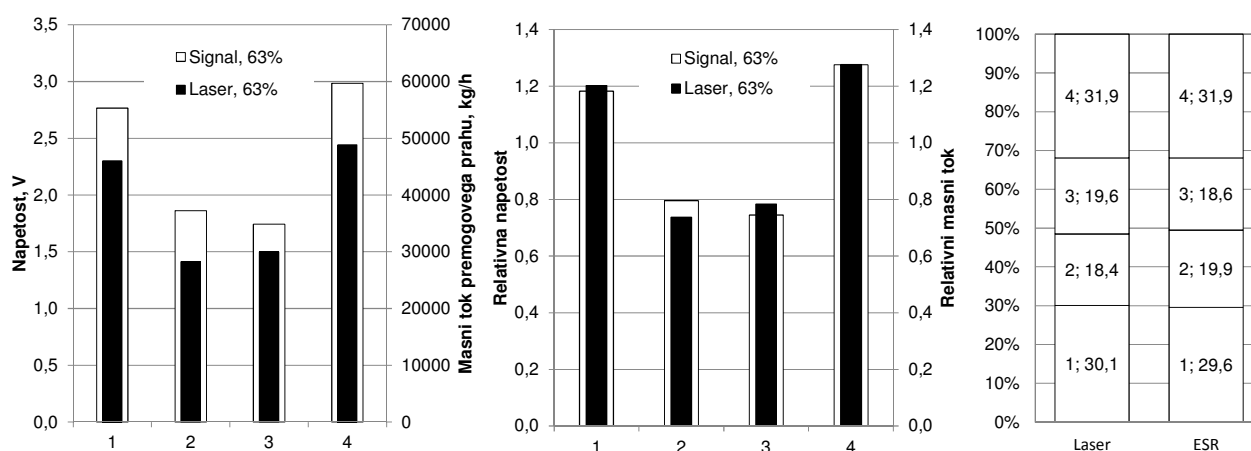
Ponovljivost je bila preverjena tako, da so se večkrat pomerili nivoji signala pri enakih obremenitvah dodajalnika. Slika 8 prikazuje povprečja nivojev signalov ESR zaznaval v prahovodnem kanalu istega mlina dveh različnih obremenitvah dodajalnika pomejena dvakrat: pri povečevanju obremenitve in pri zmanjševanju obremenitve. Ponovljivost je zadovoljiva in zadostna za predvideni namen uporabe.



Slika 8: Ponovljivosti pri dveh različnih obremenitvah dodajalnika

4.1.2 Točnost in uporabnost

Ker je predvideni namen uporabe signalov ESR zaznaval porazdeljevanje zgorevalnega zraka med šobe gorilnikov glede na porazdelitev premogovega prahu, je bilo potrebno preveriti tudi ujemanje nivojev signalov z dejanskim masnim tokom premogovega prahu.



Slika 9: Točnost in uporabnost signalov

Masni tok premogovega prahu je bil merjen nad posameznimi ESR zaznavali z laserskim merilnikom namenjenim za ugotavljanje kvalitete mletja premoga in pretoka premogovega prahu. Levi diagram na sliki 9 prikazuje absolutne vrednosti signalov ESR zaznaval in masnega pretoka izmerjenega z laserskim merilnikom. Masni tok premogovega prahu, ki ga prikazuje posamezni stolpec v diagramu je preračunan na celotni presek prahovodnega kanala. Dejanski masni tok premogovega prahu v kanalu je torej povprečje vrednosti štirih stolpcev. Srednji diagram prikazuje relativne vrednosti signalov in masnih tokov glede na srednjo vrednost. Desni diagram pa prikazuje odstotke signalov oziroma masnih tokov posamezne šobe gorilnika glede na vsoto vseh signalov oziroma skupni masni tok. Primerjava kaže, da se relativne vrednosti signalov dobro ujemajo z relativnimi vrednostmi masnih tokov in da dobro ponazarjajo porazdelitev premogovega prahu po prahovodnem kanalu.

V predstavljenem primeru, kjer je bilo izmerjeno, da skozi prvo šobo gorilnika teče okoli 30 %, skozi drugo in tretjo šobo po 19 % ter skozi četrto okoli 32 % masnega toka premogovega prahu bi bilo potrebno preveriti, ali se da premogov prah z ustreznimi ukrepi bolj enakomerno porazdeliti med šobe gorilnika. Če to ni mogoče, bi bilo potrebno v istem razmerju, kot je med šobe porazdeljen premogov prah, porazdeliti tudi zgorevalni zrak.

Če se porazdelitev premogovega prahu ne bi spreminjala, bi zadoščala enkratna meritev, na podlagi katere bi potem razporedili zgorevalni zrak. Kot je bilo že prej omenjeno, se porazdelitev premoga po kanalu spreminja v odvisnosti od obremenitve dodajalnika, obrabljenosti vitalnih delov mlina in lastnosti premoga. Najbolj pogoste so spremembe obremenitve mlina, ki ima tudi največji vpliv na razporeditev premogovega prahu. Za učinkovito sprotno prilagajanje porazdelitve sekundarnega zgorevalnega zraka porazdelitvi premogovega prahu je potrebno urediti meritve pretokov sekundarnega zraka do posameznih šob gorilnika in motorno upravljanje odprtosti regulacijskih loput.

5. ZAKLJUČKI

Občutljivost, ponovljivost in točnost signalov zaznaval, ki delujejo na principu elektrostatične razelektritve, je ustrezna za kontinuirano in natančno spremljanje porazdelitve premogovega prahu v prahovodnih kanalih.

Metoda, ki uporablja opisana zaznavala za določanje porazdelitve premogovega prahu med šobe gorilnikov bi lahko občutno pomagala pri optimiranju zgorevanja v kotlih s premogovo prašno kurjavo. Zaradi kontinuiranega spremljanja porazdelitve premogovega prahu bo mogoče z obstoječo ali nadgrajeno regulacijo pretokov zgorevalnega zraka ves čas vzdrževati optimalni razmernik zraka na vsaki šobi gorilnika ne glede na obremenitev mlina, njegovo obrabljenost in vrsto oziroma kvaliteto premoga.

Izboljšana kvaliteta zgorevanja bo nedvomno pripomogla k zmanjševanju specifične porabe premoga in emisij škodljivih snovi v okolje.

6. LITERATURA

- [1] Mohd. Fua'ad Bin Hj Rahmat, Dan Yaw Wee Lee, Electrostatic Sensor For Real-Time Mass Flow Rate Measurement Of Particle Conveying In Pneumatic Pipeline, *Jurnal Teknologi*, 41(D), Dis. 2004, pp. 91-104.
- [2] Woodhead S. R., Denham J. C., Armour-Chelu D. I., Electrostatic Sensors Applied To The Measurement Of Electric Charge Transfer In Gas-Solids Pipelines, *Jurnal of Physics: Conference Series* 15, 2005, pp. 108-112.
- [3] Lihui Peng, Yan Zhang, Yong Yan, Characterization Of Electrostatic Sensors For Flow Measurement Of Particulate Solids In Square-Shaped Pneumatic Conveying Pipelines, *Sensors and Actuators A* 141 (2008), pp. 59-67.
- [4] Laux S., Grusha J., McCharty K., Real Time Coal Flow Particle Size Measurement for Improved Boiler Operation, Foster Wheeler Energy Corporation Document (13 pages), (http://fwci.com/publications/tech_papers/files/TP_FIRSYS_00_03.pdf).
- [5] Wallash Al, Continous Voltage Monitoring Techniques for Improved ESD Auditing, *EOS/ESD Symposium* 03-394.
- [6] Woodhead S. R., Amadi-Echendu J. E., Solid Phase Velocity Measurements Utilising Electrostatic Sensors And Cross Correlation Signal Processing, 0-7803-261 5-6/95/\$4.00 © 1995 IEEE.

NASLOVI AVTORJEV

dr. Igor Kuštrin, univ. dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
Aškerčeva 6
SI-1000 Ljubljana
e-pošta: igor.kustrin@fs.uni-lj.si

mag. Jože Lenart, univ. dipl. inž.
Termoelektrarna Šoštanj
Cesta Lole Ribarja 18,
SI-3325 Šoštanj
e-pošta: joze.lenart@te-sostanj.si

Alojz Kokovnik, univ. dipl. inž.
HSE Invest d.o.o.
Obrežna ulica 170a,
SI-2000 Maribor
e-pošta: alozj.kokovnik@hse-invest.si

Primož Gostinčar, dipl. inž.
Termoelektrarna Toplarna Ljubljana
Toplarniška 19
SI-1000 Ljubljana
e-pošta: primoz.gostincar@te-tol.si

Marjan Hočevár, univ. dipl. inž.
Termoelektrarna Toplarna Ljubljana
Toplarniška 19
SI-1000 Ljubljana
e-pošta: marjan.hocevar@te-tol.si