

Frekventno regulisani pogon vibracionih sita sa debalansnim pobuđivačima: praktična realizacija i eksperimentalni rezultati

Željko V. Despotović¹, Aleksandar I. Pavlović¹, Jovana Vujić²

¹ Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Volgina 15, 11000 Beograd, Srbija,

² Elektrotehnička škola „Stari grad“, Visokog Stevana 37, 11000 Beograd,
zeljko.despotovic@pupin.rs

Kratak sadržaj: U radu je predstavljeno praktično realizovano rešenje frekventne regulacije elektromotornog pogona vibracionih sita baziranog na debalansnim vibracionim pobuđivačima. Rad vibracionih sita koja se koriste u industriji sa prosejavanje i odvajanje frakcija materijala različite granulacije je u značajnoj meri određena nagibnim uglom vibracionog sita, njegovom amplitudom, napadnim uglom pobudne sile i učestanošću oscilovanja. Frekventna regulacija pogona vibracionih sita u ovom konkretnom slučaju je omogućila dobijanje amplitudsko-frekventne (AF) karakteristike vibracionog pogona i na osnovu nje je određena optimalna radna učestanost vibracionih sita pri kojoj se obezbeđuje najbolje odvajanje pojedinih frakcija materijala. Rešenje je primenjeno na dve procesne linije u silosima za otpeljeljivanje sistema za transport i odvajanje kotlovske šljake od pepela na Termoelektrani "Nikola Tesla" B (TENT-B) u Obrenovcu. U radu su prikazani ključni eksperimentalni rezultati koji su dobijeni tokom eksploatacionih i ispitivanja i testiranja na dva realizovana sistema regulisanih vibracionih sita.

Ključne reči: vibracije, debalansni pobuđivači, vibraciona sita, energetski pretvarač, frekventna regulacija, termoelektrane

1. Uvod

Vibraciona sita su mašine koje mehaničkim vibracijama vrše razdvajanje materijala po granulaciji, na frakcije. Broj frakcija zavisi od broja etaža na samom situ. Sita koja mogu imati od jedne do četiri etaže, mogu da se koriste

za suvo prosejavanje ili vlažno prosejavanje sa pranjem, uz dodatak sistema za pranje. Samo vibraciono sito se sastoji od pogona pobuđivača koji izaziva mehaničke vibracije, prosejnih površina koje razdvajaju materijal na frakcije, rama koji služi kao oslonac za prosejne površine i transportni put za vibracije od pogona ka prosejnim površinama. Promena intenziteta prosejavanja se vrši promenom amplitude vibracija, odnosno zakretanjem i promenom težine debalansnih zamajnih masa vibracionih pobuđivača[1].

Pobuda kod vibracionih sita može biti ostvarena kružnim ili eliptičnim oscilacijama[2-4]. Kružna vibraciona sito se izrađuju sa centralnom osovinom u ramu, pri čemu ova osovina nije vezana za noseću konstrukciju sita. Ram se nalazi u većini slučajeva u težištu. Na samoj osovini se nalaze debalansne mase čije se ekscentriciteti mogu podešavati. Na krajevima je ram elastično oslonjen na noseću konstrukciju sita preko zavojnih elastičnih opruga, tako da u svim pravcima deluju kružne vibracije koje imaju približno iste povratne sile. Zbog toga se koriste relativno „meke” opruge da bi elastični oslonci sita bili što elastičniji [5-8].

U termoelektranama vibraciona sito se najčešće upotrebljavaju u sistemu transporta šljake i pepela, odnosno preciznije za odvajanje kotlovske pepela od šljake. Najprihvatljivije rešenje koje se pokazalo u praksi kod odvajanja i prosejavanja kotlovske šljake na termoelektranama se postiže vibracionim sitima koja vrše eliptične ili kružne oscilacije. Da bi vibraciono sito vršilo svoju funkciju potrebno je uzeti u obzir četiri parametra: učestanost oscilovanja sita, nagibni ugao rešetke sita u odnosu na horizontalu, amplituda oscilacija i napadni (upadni) ugao pobudne sile koja deluje na rešetku sita u odnosu na samu rešetku.

Podešavanjem amplitude pobudne sile ostvaruje se promena amplitude oscilacija vibracionog sita, a ona će uticati na intenzitet prosejavanja. Ova promena se vrši uzajamnim zakretanjem ekscentričnih zamajaca debalansnih pobuđivača. Trofazni asinhroni motori sa kratko spojenim rotorom se koriste kao pogonski elektromotori. U kombinaciji sa frekventnim energetskim pretvaračem (AC/DC/AC) može se obezbediti promena učestanosti pobudne sile a shodno tome i promena učestanosti oscilovanja. Učestanost će uticati na kvalitet prosejavanja, a ostvaruje se direktnom promenom brzine obrtanja trofaznog asinhronog motora. Amplituda pobudne sile će se povećati sa povećanjem količine smeše kotlovske šljake i pepela, odnosno sa njenom masom, čime se automatski povećava i utrošena snaga [9-10].

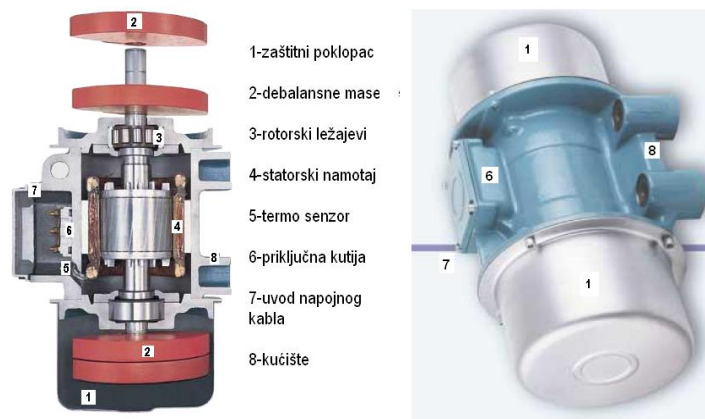
U ovom radu je prikazano unapređeno tehničko rešenje regulisanih elektromotornih pogona vibracionih sita sa jednom etažom, koja se koriste u sistemu za odvajanje šljake od pepela na TENT-B u Obrenovcu. Ovde se vibracionim sitima vrši odvajanje kotlovske pepela od šljake i prosejane sitnije čestice kotlovske pepela odvođe u sabirni cevovod. Izdvojeni krupniji komadi šljake (približnog srednjeg prečnika 30 mm - 80 mm) se odvođe u drobilicu gde se vrši njihova dodatna obrada usitnjavanjem radi dalje upotrebe. Nakon dodatnog usitnjavanja pomenutih komada šljake, dolazi do njihovog spajanja sa izdvojenim kotlovskom pepelom u sabirnom cevovodu.

Nakon ovoga se ova smeđa u određenom iznosu meša sa elektro-filtarskim pepelom i vodom i pomoću odgovarajućih cevovoda se ova hidro smeša, posredstvom vodenih ejektorskih pumpi (ejektora) izvlači i transportuje ka bager stanici, a potom primenom odgovarajućih tehnoloških postupaka transportuje ka deponiji.

2. Rekonstrukcija pogona vibracionih sita

U okviru rekonstrukcije pogona vibracionih sita su izvršene značajne modifikacije postojećeg sistema, kako u pogledu mehaničkih sklopova tako i na elektromotornom pogonu. Za oba pogona vibracionih sita je izvršeno projektovanje i ugradnja novih pogonskih debalansnih pobuđivača sa mogućnošću podešavanja amplitude oscilacija pobudne sile (ručno zakretanje ekscentara u samim pobuđivačima), projektovanje sklopa za podešavanja nagibnog ugla pobudne sile (ručno podešavanje zakretanjem vibracionog pobuđivača), ugradnja novih elastičnih oslanjajućih elemenata korita sita, zasnovanih na specijalnim elastičnim kompozitnim materijalima, projektovanje elektro-upravljačkih jedinica sistema pobuđivača uključujući i kontinualnu elektronsku regulaciju učestanosti oscilacija vibracionih sita u opsegu od 1Hz÷100 Hz [8],[11].

Kao vibracioni pobuđivači su predviđeni pobuđivači sa mogućnošću zakretanja debalansnih inercionih masa, koji su pogonjeni trofaznim asinhronim motorom. Dispozicija pobuđivača je prikazana na Slici 1.



Slika 1 – Dispozicija i izgled elektromotornih debalansnih pobuđivača .

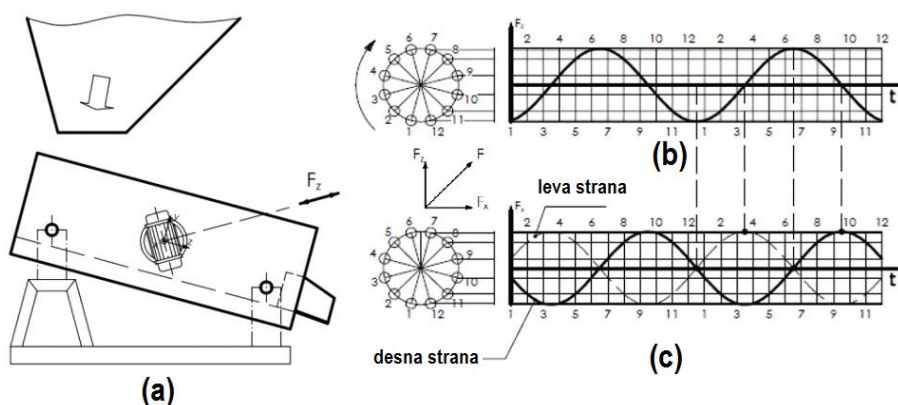
Osnovni elementi debalansnih pobuđivača su: (1) zaštitni poklopac, (2) debalansne mase sa mogućnošću zakretanja, (3) rotorski ležajevi, (4)

statorski namotaj, (5) termički senzor kao zaštita od pregrevanja namotaja statora, (6) priključna kutija, (7) ulaznik napojnog kabla i (8) kućište.

Podešavanje amplitude pobudne sile pobuđivača i frekventna regulacija pogonskih elektromotora pobuđivača su omogućili dobijanje prenosne amplitudsko-frekventne (AF) karakteristike vibracionog sita, na osnovu koje je ostvareno adekvatno upravljanje. Pored ovoga frekventna regulacija se pokazala neophodnom, kako bi se za razne režime i razne vrste granulacije materijala koji se odvaja, dobio optimalan vibracioni transport odnosno prosejavanje, i shodno tome je eliminisan efekat zagušenja transportne linije, koji je vrlo često dovodio do neželjenih zastoja koji bi mogli ugroziti pouzdan rad termobloka [8-11].

Značajno poboljšanje rada vibracionog sita je izvršeno realizacijom sistema zakretanja vibracionih pobuđivača čime je određen optimalan ugao β između pravca pobudne sile i ravni rešetke sita. Inače je specijalnim zakretnim sklopom obezbeđen opseg kontinualnog podešavanja ovog ugla β u opsegu $0 \div 90^\circ$.

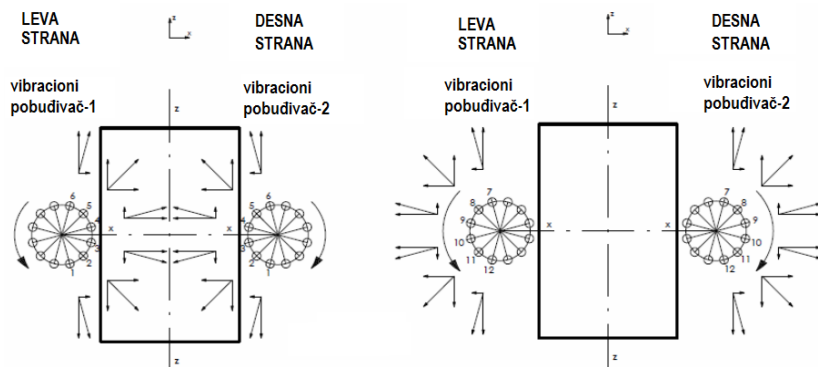
Na Slici 2 je dat principski prikaz realizacije linearnih oscilacija korita vibracionog sita. Ovim načinom realizacije vektor pobudne sile umesto rotacionog kretanja, vrši linearno kretanje duž pravaca koji je nagnut pod uglom koji se može podešavati u odnosu na rešetku sita. Na Slici 2(a) je dat način montaže debalansnih pobuđivača, a takođe su prikazani vremenski dijagrami sila vibracionih pobuđivača: pobudne sile koja je data na Slici 2(b) i vremenske promene ekvivalentne poništene centrifugalne sile od pobuđivača na levoj i desnoj strani, koje su prikazana na Slici 2(c). Novom konstrukcijom su obezbeđena prosto periodična (harmonijska) dejstva pobudne sile pobuđivača, s tom napomenom da su pobudne sile leve i desne strane u protiv fazi.



Slika 1. Montaža pobuđivača i delovanje sila kod linearnih oscilacija vibracionog sita

Vektorski dijagrami pobudnih sila vibracionih pobuđivača su dati na Slici 3. Uočava se vektorski plan sila pobuđivača, pri čemu je pobudna sila usmerena ka osi sita (prikaz levo) i od ose sita (prikaz desno).

Vrednost amplitude linearne oscilatorne pobudne sile vibracionog sita se ostvaruje podešavanjem ugla zakretanja α [°] između ekscentarskih zamajnih masa u svakom od pobuđivača. Opseg podešavanja ovog ugla je 0°-178°.



Slika3. Princip rada debalansnih vibracionih pobuđivača [11-12]

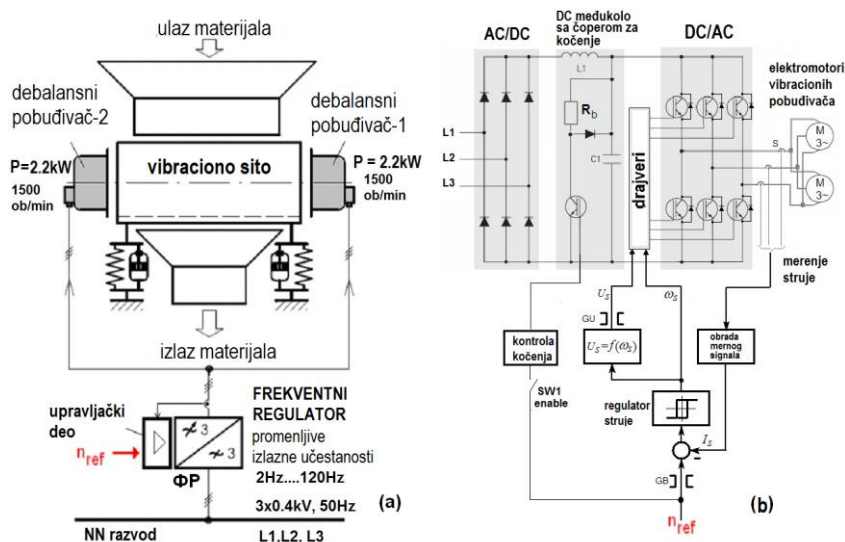
3. Realizovani frekventno regulisani elektromotorni pogoni vibracionih sita

Da bi sistem sa linearnom pobudnom silom vibracionog sita funkcionisao korektno, pobudne sile vibracionih pobuđivača moraju biti sinhronizovane i biti u protiv fazi. Usled bilo kakve nesimetrije, čak i pri idealnoj ugradnji vibracionih pobuđivača, može doći do poremećaja linearnih oscilacija i do pojave bočnih oscilacija sita. Nivo tih oscilacija, odnosno njihova amplituda i njihova učestanost su utvrđene tokom opsežnih testiranja i ispitivanja celokupne mehaničke konstrukcije pre i nakon ugradnje novoprojektovanih vibracionih pobuđivača.

Na osnovu brojnih merenja amplitude i učestanosti oscilacija na oba vibraciona sita je konstatovano da je celokupna mehanička konstrukcija korektno izrađena i da je izvršeno njeno zadovoljavajuće balansiranje. Iz ovog razloga je usvojeno jednostavnije i značajno jeftinije varijantno rešenje, prema kojem se napajanje pogonskih elektromotora vibracionih pobuđivača sa integrisanim zamajnim masama, ostvaruje iz istog AC/DC/AC energetskog pretvarača, odnosno frekventnog regulatora [8],[11-12].

Predloženo rešenje ovog upravljačkog sistema je U/f regulacija sa kontrolom struje motora (i bez povratne sprege po brzini) i podrazumeva da postoji idealna simetrija svih oscilatornih masa tokom kompletnog radnog

ciklusa. Ovo varijantno rešenje je prikazano principskim blok šemama na Slici 4.



Slika 4. Upravljačka struktura sistema vibracionih pobuđivača u otvorenoj sprezi (bez senzora broja obrtaja); (a) principska blok šema celokupnog pogona, (b) principska blok šema U/f frekventne regulacije [8-9]

Vrlo bitna i ujedno olakšavajuća okolnost je bila ta, što je sistem tako projektovan da je obezbeđeno da usled dejstva gravitacione sile na ekscentarske mase dolazi do tzv. samo-sinhronizacije početnog položaja u nultom stanju, tako da su početne faze pobudnih sila jednake.

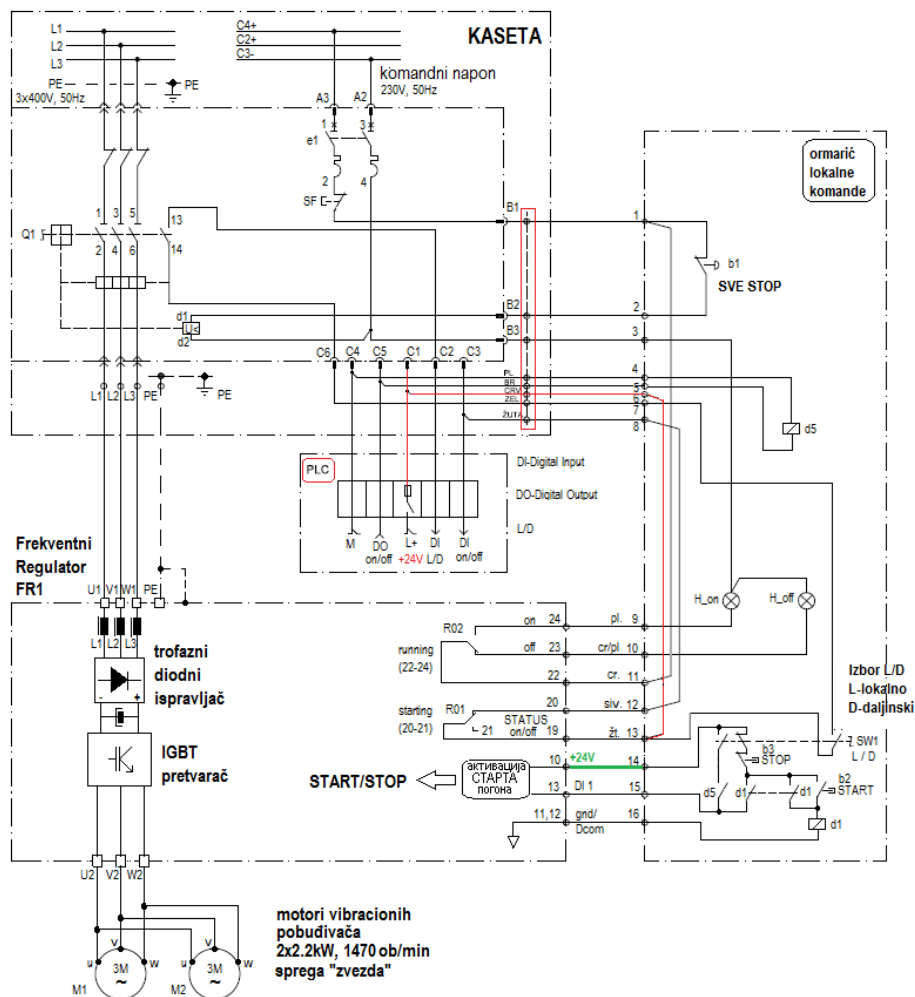
Slika 4(a) prikazuje principsku blok šema celokupnog pogona vibracionog sita, dok je na Slici 4(b) prikazana principska šema U/f frekventne regulacije. Zadata vrednost brzine obrtanja je referentna vrednost, a samim tim je ista za oba pogonska motora. Frekventni regulator služi za podešavanje brzine obrtanja pogonskih motora vibracionih pobuđivača. Vrednost frekvencija tj. učestanost pobudne sile se kreće u intervalu od $2 \text{ Hz} \div 100 \text{ Hz}$.

U ovom sistemu postoje izvesna tehnička ograničenja. Prvo ograničenje je ograničenje po masi šljake koju pobuđivači mogu da dovedu u stanje oscilovanja i prosejavanja. Masa šljake je određena masom korita sita tj. veličinom samog korita i protokom šljake kroz dovodni levak sistema. Masa se kreće u intervalu $m = \{500 \div 1200\}[\text{kg}]$. Drugo ograničenje je po pobudnoj učestanosti, i ono je određeno mehaničkom izdržljivošću ležajeva elektro-vibracionih pobuđivača, kao i brojem pari polova njegovih namotaja. Još jedan segment bitan je samo ograničenje karakteristika frekventnih regulatora koje služe za njihovo napajanje:

-Brzina obrtanja; $n = \{60 \div 3000\}[\text{ob/min}]$ ili učestanost $f = \{2 \div 100\}[\text{Hz}]$,

-Amplituda oscilovanja; $A_m = \{1 \div 10\}$ [mm] vibracionog sita je određena masom i najmanjim uglom između ekscentričnih zamajaca pobuđivača. Snaga $P = \{0.5 \div 4\}$ [kW], što je zapravo nazivna snaga električnih pobuđivača.

Treba napomenuti da su ova ograničenja međusobno zavisna iako se nezavisno podešavaju. Sistem će pri maksimalnoj snazi pobuđivača dostići veću vrednost učestanosti prosejavanja, pri manjoj amplitudi i obrnuto (pri istoj masi šljake na rešetci sita). Na Slici 5 je prikazana električna šema regulisanog AC pogona jednog od ukupno dva vibraciona sita.



Slika 5. Električna šema realizovanog pogona vibracionog sita

Glavni elementi regulisanog pogona: (1) frekventni regulator, (2) trofazni elektromotori debalansnih pobuđivača (svaki snage od 2.2kW), spregnutih u

„zvezdu“ (3) programibilni logički kontroler(PLC), (4) razvodni orman lokalne komande, (5) kasete u postojećem razvodu u kojima su smešteni zaštitni i rasklopni elementi.

Sa električne šeme na Slici 5 se vidi da upravljanje može da se ostvaruje na dva načina: (1) lokalno (sa ormarića lokalne komande) odakle može da se sistem startuje ili zaustavi sistem pomoću START/STOP tastera ili (2) daljinski, kada je preklopnik postavljen u položaj za daljinsko upravljanje. I u ovom drugom slučaju, datim sistemom se može upravljati preko PLC-a. Iz kasete se napaja frekventni regulator, a takođe se obezbeđuje i komandni napon od 230 V, 50Hz. Na ormariću se takođe nalazi SVE STOP taster kao i signalne LED za indikaciju rada vibracionih pobuđivača u pogonu.

Na Slici 6 je dat fotografski prikaz dva nezavisna realizovana regulisana pogona vibracionih sita koji su bazirani na frekventnoj regulaciji u postrojenju za odvajanje kotlovske šljake od pepela na TENT-B.



Slika 6. Prikaz realizovanih frekventno regulisanih pogona vibracionih sita na TENT-B

4. Eksperimentalni rezultati

Nakon završetka montaže vibracionih sita i frekventnih regulatora je bilo neophodno izvršiti merenje, ispitivanje i dokaz tehničkih karakteristika. Ovom rekonstrukcijom pogona vibracionih sita obezbeđeno je regulisanje učestanosti i amplitude ukupne pobudne sile.

Tokom eksploatacionih ispitivanja i puštanja u rad rekonstruisanih pogona izvršena su merenja karakterističnih vrednosti vibracionih sita. Na svakom od vibracionih sita su merene sledeće mehaničke veličine: ubrzanje i pomeranje korita vibracionog sita, kao i električne veličine: struje i naponi

elektromotora vibracionih pobuđivača. U eksperimentima je korišćena sledeća merna oprema:

-MEMS senzor ubrzanja (troosni) zasnovan na integrisanom kolu ADHL330-analogni uređaji, sa opsegom vrednosti $0 \dots \pm 3,6 \text{ g}$ ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) i osetljivošću izlaznog pojačavača 300 (330) mV/g (pri 3.3 Vdc);

-Senzor pomeraja zasnovan na induktivnom senzoru blizine sa analognim izlazom $0 \div 10 \text{ V}$, BAW M30ME-UAC15f-s04g BALLUF, opseg pomeranja 3 mm -15 mm, sa osetljivošću 1.2 mm/V;

-Naponski LEM modul LEV100-1000/SP9, 1000V/50mA, sa mernim otpornikom $R_m = 80 \Omega$ i osetljivošću 40 mV/V;

- Strujna klešta za osciloskop CHAVIN ARNOUX0-1000A, opseg 10 Hz \div 20 kHz, tri opsega osetljivosti: 100 mV/A, 10 mV/A i 1 mV/A;

-Dvokanalni osciloskop Wawe Ace 1002, 2 GS/s, 300 MHz propusnog opsega, TELEDINE LECROY.

Mehanizmom kojim se obezbeđuje zakretanje vibracionih pobuđivača moguće je podesiti ugao β . Rešetka sita je nagnuta u odnosu horizontalnu ravan pod stalnim uglom od 15° . Znači da će se ugao između pravca linearne pobudne sile i rešetke sita i ugao između pravca pobudne sile na horizontalnu ravan računati kao $\varphi = \beta + 15^\circ$.

Pri eksploatacionim ispitivanjima na TENT-B je utvrđeno da je u pogledu optimalnog odvajanja šljake i pepela ovaj ugao potrebno podesiti na vrednost 30° , odnosno ugao između pravca linearne pobudne sile i rešetke sita treba podesiti na vrednost 15° .

Snimanjem AF karakteristika vibracionih sita sa rekonstruisanim pogonom vrednost ugla β se nije menjala i ugao je bio fiksiran na $\beta = 15^\circ$, dok je amplituda pobudne sile je podešavana zakretanjem ekscentričnih zamajaca za ugao α u intervalu $5^\circ \div 175^\circ$.

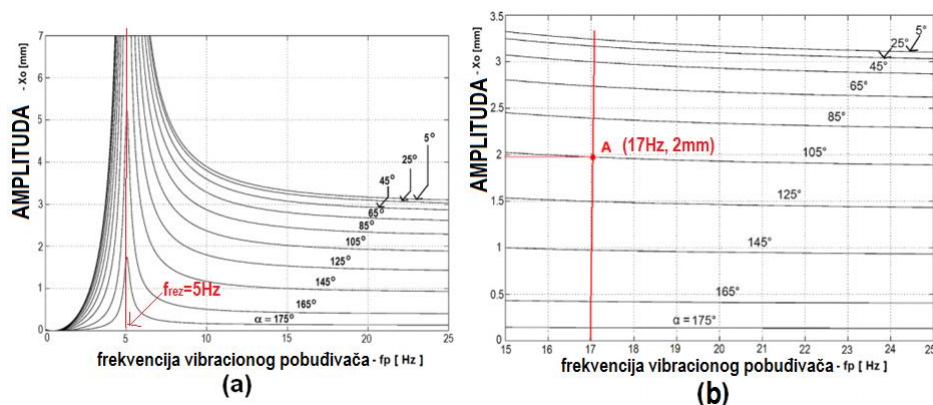
Zavisnost pobudne sile je nelinearna funkcija kosinusa ugla α . Pri radnoj učestanosti od 107 rad/s, uglu zakretanja od 5° dobija se maksimalna vrednost amplitude pobudne sile od $F_{\max} = 22.5 \text{ kN}$, dok se pri uglu zakretanja 175° dobija minimalna vrednost pobudne sile $F_{\min} = 1.4 \text{ kN}$ [9].

Podešavanje učestanosti pobudne sile ostvareno je frekventnom regulacijom, odnosno promenom brzine obrtanja zamajnih masa. Promenom učestanosti struje pogonskih elektromotora u opsegu 1 Hz \div 100 Hz, pri čemu se obezbeđuje promena brzine obrtanja u opsegu 600-1500 ob/min, dok je pri ovome promena učestanosti pobudne sile bila u opsegu 1Hz \div 50 Hz.

Primarni cilj eksperimentalnih testova je bio dobijanje familije AF karakteristika sistema vibracionog sita, odnosno zavisnosti amplitude od učestanosti za razne vrednosti ugla α i dobijanje pod-rezonantnih i nad-rezonantnih karakterističnih krivih u funkciji od ugla između težišta ekscentričnih zamajaca za različite vrednosti pobudne učestanosti.

U nastavku je dat prikaz familija AF karakteristika vibracionog sita, sa uglom zakretanja zamajnih masa α kao parametrom ($\alpha = 5^\circ \div 175^\circ$). Promena brzine obrtanja ekscentarskih masa ostvarena je frekventnom regulacijom u opsegu $60 \div 1500$ ob/min, što odgovara promeni učestanosti pobudne sile $2 \text{ Hz} \div 50 \text{ Hz}$.

Dobijene zavisnosti amplitude oscilovanja vibracionog sita su prikazane na Slici 7. Na Slici 7(a) je data celokupna AF karakteristika i ona je veoma značajna jer se sa nje može odrediti rezonantna učestanost mehaničke konstrukcije vibracionog sita i opseg promene amplitude vibracija u zavisnosti od učestanosti i ugla α . Ove karakteristike su snimljene za ukupni radni opseg (pod-rezonantni, rezonantni i nad-rezonantni) vibracionog sita. Uočava se da je rezonantna učestanost oko 5Hz. Treba napomenuti da postoji mali problem što svaki put pri uključenju, odnosno pri ubrzavanju i pri isključenju, odnosno usporavanju vibracionog sita, ono prolazi kroz rezonantnu učestanost. Ovaj fenomen iziskuje potrebu za brzim prolaskom kroz rezonantnu učestanost pri ubrzavanju i što bržim kočenjem pri usporavanju kako bi sito što kraće vremena radilo u rezonantnoj učestanosti, pošto se pri njoj imaju značajna naprezanja elastičnih oslanjajućih elemenata, ali i same mehaničke konstrukcije sita. Stoga je veoma bitan što kraći rad u oblasti rezonance. Radna tačka mora biti značajno iznad ove vrednosti rezonantne učestanosti (u tzv. nad-rezonantnom opsegu), obzirom da se pri rezonantnoj učestanosti ima značajan porast amplitude oscilacija.



Slika 7. Amplitudno-frekventna (AF) karakteristika vibracionog sita; (a) AF karakteristika za ceo opseg učestanosti, (b) AF karakteristika za nad-rezonantni opseg

Zavisnost amplitude od učestanosti za nad-rezonantni opseg prikazan je na Slici 7(b). U nad-rezonantnom opsegu se uočava radna tačka A pri kojoj se ima učestanost oscilacija sita od 17.1 Hz i amplituda oscilovanja od 2 mm, pri uglu zakretanja zamajnih masa od 105° .

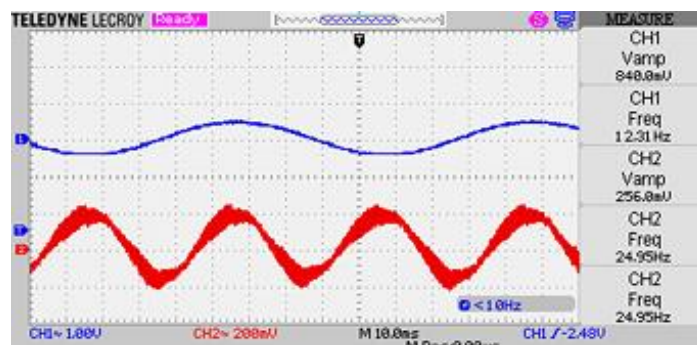
Osciloskopski snimci

U ovom su predstavljeni i analizirani ključni eksperimentalni rezultati za razne režime jednog od dva realizovana sistema regulacije vibracionih sita u

nad-rezonantnom režimu. Podešavanjem učestanosti oscilacija vibracionog sita posredstvom frekventnog regulatora dobijene su optimalne vrednosti učestanosti rada.

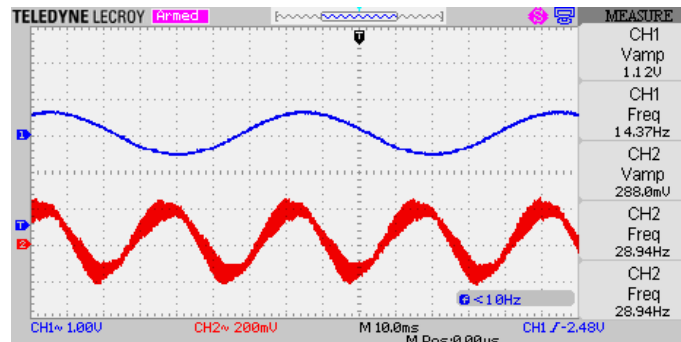
Na osciloskopskom snimku na Slici 8 su dati talasni oblici ubrzanja nosećeg elementa vibracionog sita (kanal CH1) i struje pogonskog asinhronog motora debalansnog pobuđivača (kanal CH2). Sa snimaka se uočava da je zadata vrednost učestanosti struje pobuđivača iznosila 25Hz, a da je učestanost ubrzanja pokretnog dela vibracionog sita iznosila 12.3Hz. Ova vrednost učestanosti je približno duplo manja, što je u skladu sa teoretskim razmatranjem koje je prikazano u referenci [11].

Podešeno je zakretanje debalansnih masa pod uglom koji je obezbedio amplitudu ubrzanja od 1.26 g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), dok je primenom pobudne struje pobuđivača učestanosti od 24.95Hz, dobijena učestanost pobudne sile, odnosno ubrzanja vibracionog sita od 12.31Hz. Pri učestanosti obrtnog polja asinhronne mašine od 24.95Hz dobijena je sinhrona brzina 748 ob/min. Amplituda pobudne struje u ovom slučaju je iznosila 6.4 A, dok je njena efektivna vrednost iznosila 4.54 A. U struji pobuđivača se uočava talasnost struje od maksimalno 30 % koji je posledica primenjene naponske modulacije širine impulsa (naponskog PWM-a) iz trofaznog AC/DC/AC pretvarača (frekventnog regulatora). Učestanost PWM-a je pri ovim uslovima podešena na vrednost $f_{\text{pwm}} = 4 \text{ kHz}$.



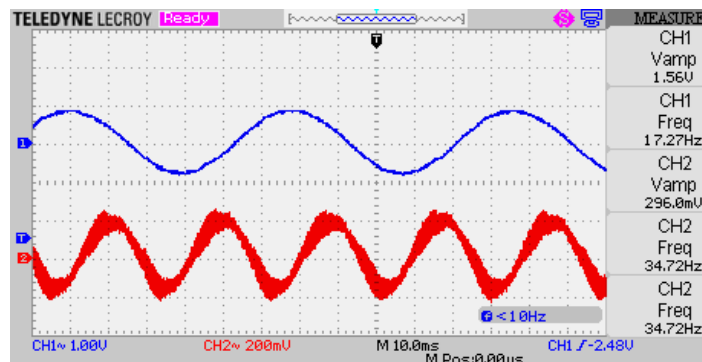
Slika 7. Osciloskopski snimci ubrzanja sita i struje pogonskog motora pri učestanosti od 25 Hz; CH1-ubrzanje 3g/pod, CH2-struja 10A/pod, vreme 10ms/pod

Na osciloskopskom snimku na Slici 8 su dati talasni oblici ubrzanja nosećeg elementa vibracionog sita – vibracionog korita (kanal CH1) i struje pogonskog asinhronog motora debalansnog pobuđivača (kanal CH2). Sa snimka se uočava da je zadata vrednost učestanosti struje pobuđivača iznosila 28.94 Hz, a da je učestanost ubrzanja pokretnog dela vibracionog sita iznosila 14.37 Hz. Podešeno je zakretanje debalansnih masa čime je obezbeđena amplituda ubrzanja od 1,68 g, dok je primenom pobudne struje pobuđivača učestanosti od 28.94 Hz, dobijena učestanost pobudne sile, odnosno ubrzanja vibracionog sita od 14.37 Hz. Amplituda pobudne struje u ovom slučaju je iznosila 7.2 A, dok je njena efektivna vrednost iznosila 5.11 A.



Slika 8. Osciloskopski snimci ubrzanja sita i struje pogonskog motora pri učestanosti 30 Hz; CH1-ubrzanje 3g/pod, CH2-struja 10A/pod, vreme 10ms/pod

Osciloskopski snimak za slučaj koji se pokazao kao optimalan je prikazan na Slici 9.

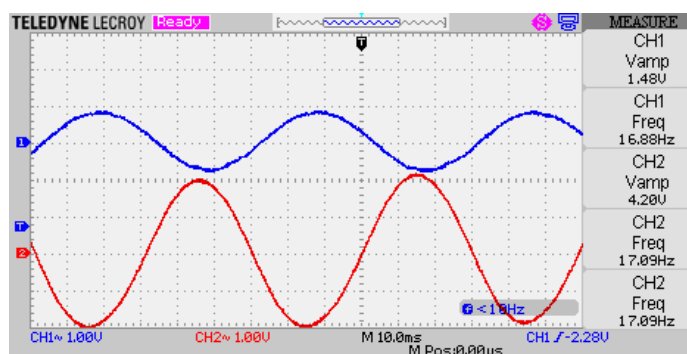


Slika 9. Osciloskopski snimci ubrzanja sita i struje pogonskog motora pri učestanosti 34.2 Hz; CH1-ubrzanje 3g/pod, CH2-struja 10A/pod, vreme 10ms/pod

Na ovom osciloskopskom snimku su dati talasni oblici ubrzanja vibracionog sita – vibracionog korita (kanal CH1) i struje pogonskog asinhronog motora debalansnog pobuđivača (kanal CH2). Sa snimka se uočava da je zadata vrednost učestanosti struje pobuđivača iznosila 34.2 Hz, a da je učestanost ubrzanja pokretnog dela vibracionog sita iznosila 17.27 Hz. Podešeno je zakretanje debalansnih masa čime je obezbeđena amplituda ubrzanja od 2,38 g, dok je primenom pobudne struje pobuđivača učestanosti od 34.2 Hz, dobijena učestanost pobudne sile, odnosno ubrzanja vibracionog sita od 17.27 Hz. Amplituda pobudne struje ("peak-peak") u ovom slučaju je iznosila 14.8 A, dok je njena efektivna vrednost iznosila 5.25 A. U struji pobuđivača se uočava talasnost struje od maksimalno 30 % koji je posledica primenjenog naponskog PWM iz trofaznog AC/DC/AC pretvarača (frekventnog regulatora).

Na snimku koji je dat na Slici 10 su dati talasni oblici vibracionog ubrzanja i vibracionog pomeraja pokretnog dela (korita) vibracionog sita u nominalnom

(optimalnom) režimu vibracionog sita pri pobudnoj učestanosti od 16.88 Hz (≈ 17 Hz). Učestanost pobudne struje pobuđivača koja se dobija iz energetskog AC/DC/AS pretvarača je iznosila 34 Hz. Amplituda pomeraja ("peak-peak") u ovom slučaju je iznosila oko 5 mm dok je ista amplituda ("peak-peak") za ubrzanje iznosila 4.4 g, odnosno maksimalna vrednost ubrzanja od 2.2g. Takođe se uočava da su ubrzanje i hod u kontra fazi što je u skladu sa teorijom.



Slika 10. Osciloskopski snimci ubrzanja i pomeraja sita pri pobudnoj učestanosti od 17 Hz; CH1-ubrzanje 3g/pod, CH2-struja 10A/pod, vreme 10ms/pod

5. Zaključak

U ovom radu je predstavljeno unapređeno tehničko rešenje elektro-mehaničke konstrukcije vibracionih sita i pripadajućih regulisanih pogona primenjenih na TENT-B u okviru sistema za transport i odlaganje šljake i filtarskog pepela. Konkretno, tehničko rešenje je realizovano na sistemu za prosejavanje i odvajanje šljake od kotlovskog pepela, koji se nalazi u silosima za otpeljeljivanje na kraju kosog mosta TENT-B. Prikazanim rešenjem je obezbeđeno podešavanje amplitude i učestanosti oscilacija vibracionog sita, kao i podešavanje nagibnog ugla rezultantne sile pobuđivača u odnosu na rešetku sita. Mehanički i elektro-upravljački sistemi su realizovani na vibracionim sitima sa jednom etažom, ali nema nikakve prepreke da se on primeni i u sistemima za prosejavanje i klasifikaciju, koji imaju više etaža. Realizovano tehničko rešenje bi se moglo primeniti u svim tehnološkim procesima i procesnim industrijama u kojima se vrši prosejavanje (proces razdvajanja materijala prema krupnoći, zasnovan na geometrijskom upoređenju oblika i veličine zrna sa oblikom i veličinom otvora prosejne površine) i klasifikacija (proces razdvajanja materijala i zrna koji se zasniva na različitim brzinama kretanja zrna različite krupnoće u nekom fluidu).

Literatura

- [1] D.D.Barkan, Vibration Methods in Construction, Cold Regions Research and Engineering LAB-HANOVER NH, November 1974.
- [2] I.Šišić, J.Sredojević, "Konstruktivno-tehnološke karakteristike dinamičkih kružnih vibracionih sita", *Mašinstvo* 3(5), pp.171-181, 2001.
- [3] H. Xiao-mei, L. Chu-sheng, "Dynamics and screening characteristics of a vibrating screen with variable elliptical trace", *Mining Science and Technology* 19 (2009) pp. 508-513.
- [4] T. Zhichao, Y.Zhongjun, H.Tian, S. Xin, and Z. Lianwan, "Research on Dynamic Characteristics of Elliptical Vibrating Screen", *International IEEE Conference-Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010.
- [5] F. Ma, "Dynamic characteristic analysis of vibrating screen", *Coal Mine Machinery*, 6 (1996) 40.
- [6] F. Wang, L. Liu, "Dynamic characteristic analysis of screening machine", *Coal Mine Machinery*, 10 (1989) 41-43.
- [7] Z.Yue-min, L. Chu-sheng, H. Xiao-mei, Z. Cheng-yong, W. Yi-bin, R. Zi-ting, "Dynamic design theory and application of large vibrating screen", *Procedia Earth and Planetary Science*, Volume 1, Issue 1, September 2009, pp.776-784
- [8] Z. V. Despotovic , A.M. Pavlovic, J.Radakovic, "Using Regulated Drive of Vibratory Screens with Unbalanced Motors ", *Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology*, Vol.1, No.3, pp.20-25, 2016.
- [9] V.Ž.Filipović, M.Matijević, P.Mišljen, Ž.V.Despotović, „Outlier Robust Identification of the Thermal Power Plant: Combustion Control and the Solid Fuel Combustion Products Vibratory Transport“, *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol.19, No3, March 2020.
- [10] V.Čudić i ostali, "Pepeo iz termoelektrana kao sekundarna sirovina", *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* 58.2 (2007): 233-238.
- [11] Ž.V.Despotović, A.M.Pavlović, D.Ivanić, "Exciting Force Frequency Control of Unbalanced Vibratory Actuators", *20th International IEEE Symposium of Power Electronics (Ee)-2019*, Novi Sad, Serbia, DOI: 10.1109/PEE.2019.8923574.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8923574>
- [12] Ž.V.Despotović, A.Pavlović, "Reconstruction of Vibratory Sieves Drives in System for Separation Boiler Ash from Slag on Thermal Power Plant TENT-B", *Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2016"*, 23-27 November 2016, Zlatibor, Serbia.

Abstract. The paper presents a practically realized technical solution for frequency control of the AC power drive of vibrating sieves based on unbalanced vibration exciters. The operation of vibrating screen used in the industry for sieving and separating material fractions of different granulations is determined to a significant extent by the tilting angle of the vibrating sieve, its amplitude, the angle of attack of the excitation force and the frequency of oscillation. The frequency control of the vibrating sieves drive in this particular case made it possible to obtain the amplitude-frequency (AF) characteristic of the vibrating screen and based on it, the optimal operating frequency, which ensures the best separation of individual material fractions was determined. The solution was applied to two process lines in silos for de-ashing in the system of transport and separation of boiler slag from ash at the Thermal Power Plant "Nikola Tesla" B (TPP-B) in Obrenovac. The paper presents the key experimental results that were obtained during exploitation and testing of two implemented systems of regulated vibrating sieves.

Keywords: vibration, unbalanced exciters, vibratory sieves, power converter, frequency control, thermal power plant

Frequency Controlled Drive of Vibrating Screens with Unbalanced Exciters: Practical Implementation and Experimental Results

Željko V. Despotović, Aleksandar M. Pavlović, Jovana Vujić

Rad primljen u uredništvo: 28.11.2023. godine.

Rad prihvaćen: 25.12.2023. godine.

