

# Dizajn automatskog bušača kroz nadogradnju postojeće mehaničke kočnice i rezultati ispitivanja na Croscovoj bušačkoj garnituri N-402

Retrofitting design of an automated drilling system using the legacy mechanical brake and test results from Croscó's N-402 drilling rig

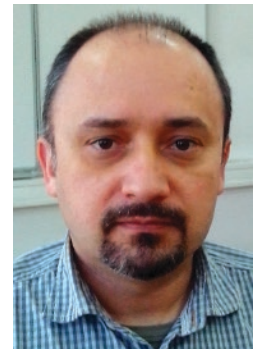
Zdravko Kučan, ing.  
Nev-El, d.o.o. Zagreb

Pavle Šprljan, mag. ing.  
Proton EL, d.o.o.

Josip Mišković, dipl. ing.  
CROSCO naftni servisi, d.o.o.

dr. sc. Mihael Cipek, docent  
dr. sc. Matija Krznar, viši asistent  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

dr. sc. Danijel Pavković,  
izvanredni profesor  
Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Danijel.Pavkovic@fsb.hr



**Ključne riječi:** regulacija sile nasjeda i brzine prodiranja bušačkog alata, nadogradnja sustava dizalice bušačkog niza, proporcionalno-integralni regulator, ispitivanje na terenu

**Key words:** Weight-on-bit and rate-of-penetration control, draw-works system retrofitting, proportional-integral controller, field testing

## Sažetak

Značajan dio bušačkih postrojenja koja su danas u upotrebi i dalje je opremljen mehaničkim sustavima upravljanja silom nasjeda bušačkog alata (*WoB*) i njegovom brzinom prodiranja (*RoP*) zasnovanim na polužnom mehanizmu kočnice vitla dizalice kojim upravlja ljudski operater. Kako bi se zadovoljili sve stroži zahtjevi u pogledu izvedbe *WoB/RoP* su-

stava upravljanja, uključujući potpuno automatski rad (automatsko bušenje), takve „zrele“ pogonske sustave za upravljanje procesom bušenja potrebno je nadograditi odgovarajućim servo mehanizmom polužnog aktuatora kočnice, zajedno s odgovarajućim *WoB/RoP* regulacijskom strategijom. Stoga se u ovom radu predstavlja razvoj sustava za kontrolu *WoB/RoP* zasnovan na elektromotornom servoaktuatoru kočnice pogona vitla dizalice bušačkog niza. Sveukupni upravljački sustav organiziran je u takozvanu kaskadnu strukturu regulacije, sa nadređenom regulacijskom petljom sa proporcionalno-integralnim (PI) regulatorom sile nasjeda, koji zadaje komandu brzine prodiranja PI regulatoru na nižoj razini koji regulira brzinu prodiranja, a koji pak zadaje referencu položaja servopogonu polužnog mehanizma aktuatora kočnice. Predloženi sustav regulacije *WoB/RoP* implementiran je na industrijskom upravljačkom

hardveru, koji je potom instaliran i detaljno ispitan na kopnenoj bušačoj garnituri N-402 tvrtke CROSCO, naftni servisi, d.o.o.



## Abstract

A notable portion of contemporary deep drilling rigs are still equipped with manually-operated lever-based draw-works (hoist) drum mechanical brake actuators, which are used for weight-on-bit (*WoB*) and rate-of-penetration (*RoP*) control. In order to meet increasingly stringent requirements on the *WoB/RoP* control performance, including completely automatic vertical drilling operation (auto-drilling), such mature drilling systems need to be retrofitted with a suitable brake actuator servo mechanism, along with appropriate *WoB/RoP* control strategy. To this end, this paper presents the development of a weight-on-bit and penetration rate control system based on electrical servomotor-based draw-works brake actuator. The control system has been arranged in the so-called cascade control system structure, wherein the superimposed control loop based on the proportional-integral (PI) *WoB* controller is commanding the inner *RoP* PI controller, which in turn provides a position reference to the brake lever mechanism servo-actuator. The proposed *WoB/RoP* control system has been implemented on industrial control hardware that has been subsequently installed and thoroughly tested on the CROSCO oilfield services Ltd. N-402 land drilling rig.

## 1. Uvod

Radi zadovoljenja potražnje za sirovom naftom i plinom iz postojećih rezervi, te kako bi se na taj način osigurala njihova stalna raspoloživost u uvjetima neizvjesne opskrbe, potrebna je visoko učinkovita upotreba postojećih postrojenja za istražno i eksploatacijsko bušenje (Foss, 2012). Međutim, značajan dio starijih bušačkih postrojenja i dalje je opremljen ručno upravljanom mehaničkom kočnicom vitla dizalice bušačkog pogona (Lyons i Plisga, 2005), koju operater koristi za postupno spuštanje bušačkog niza primjenom odgovarajućeg koloturnog mehanizma dizalice, te na taj način modulira silu nasjeda alata (engl. Weight-on-Bit, *WoB*) tijekom bušenja. Međutim, zbog relativno neprecizne ručne kontrole kočenja, produktivnost bušenja i brzina prodiranja (engl. rate-of-Penetration, *RoP*) bušačkog niza i sigurnost u radu takvih „zrelih“ bušačkih postrojenja manje su konkurentni u odnosu na suvremene sustave automatskog bušenja.

Kako bi se poboljšale performanse starijih, odnosno „zrelih“ bušačkih garnitura, a time također proizvedio i njihov koristan životni vijek, takva se postrojenja obično nadograđuju (engl. retrofitting) naprednijim sustavima upravljanja vitlom dizalice bušačkog niza, poput onih koji se temelje na:

1. servo-hidrauličkom (Wu, Li i drugi, 2010) ili servo-pneumatskom (Ray, 2006) aktuatoru kočnice bubnja vitla dizalice;
2. elektromehaničkim aktuatorima kočnice primjenom elektromotornog servopogona za pozicioniranje polužnog mehanizma mehaničke kočnice (Power i Glaser, 2006), a koji još uvijek predstavlja standardno industrijsko rješenje za nadogradnju pogona dizalice (National Oilwell, 2020); ili
3. kroz upotrebu glavnog ili pomoćnog električnog motora dizalice za pozicioniranje bubnja vitla tijekom bušenja (Zhao, Wang i drugi, 2007), a što je ujedno i najmodernija tehnologija koja se koristi u praksi (Aker Solutions, 2020).

Potonji pristup, karakteriziran dvosmjernom regulacijom brzine vrtnje bubnja, također se može koristiti za ublažavanje vibracija bušačkog niza i alata pomoću aktivne kontrole sile nasjeda na bušačem alatu (Canudas-de-Wit, Rubio i drugi, 2008), odnosno kroz koordiniranje vertikalne i rotacijske osi bušačkog niza (Pavković, Šprljan i drugi, 2021).

Budući da bi prije spomenute nadogradnje bušačkih sustava trebale biti daleko jeftinije od nabave potpuno novog bušačkog postrojenja opremljenog najsuvremenijim pogonskim sustavima i sustavima automatizacije, nadogradnja starijih bušačkih postrojenja sigurno bi bila karakterizirana znatno kraćim razdobljem povrata ulaganja, te bi tako bila prihvatljivija malim i srednjim kompanijama u sektoru usluga izrade bušotina (Kaiser i Snyder, 2013). Među gore spomenutim rješenjima sustava regulacije *WoB/RoP* temeljenim na pogonu dizalice bušačkog niza, ona koja uključuju servo-aktuatore polužnog mehanizma kočnice bubnja trebala bi biti karakterizirana relativno niskim investicijskim troškovima i niskom snagom pogona aktuatora, posebice u usporedbi sa sustavima automatskog bušenja koji se temelje na pomoćnom ili glavnom elektromotoru vitla dizalice.

Stoga je 2013. godine pokrenut suradni razvojni projekt između domaćih tvrtki CROSCO naftni servisi, HELB i Nev-El te Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu s ciljem razvoja domaćeg rješenja sustava automatskog bušača koji će zahtijevati minimalne preinake na postojećim bu-

šaćim garniturama, a s ciljem unaprjeđenja procesa izrade bušotine u smislu veće produktivnosti procesa bušenja te poboljšane ergonomije i sigurnosti rada. U nastavku rada se opisuju pojedini aspekti razvijenog rješenja čija je funkcionalnost ispitana na terenu na CROSCO-voj bušačkoj garnituri N-402 u ožujku 2014. godine (Pavković, Milutinović i drugi, 2014).

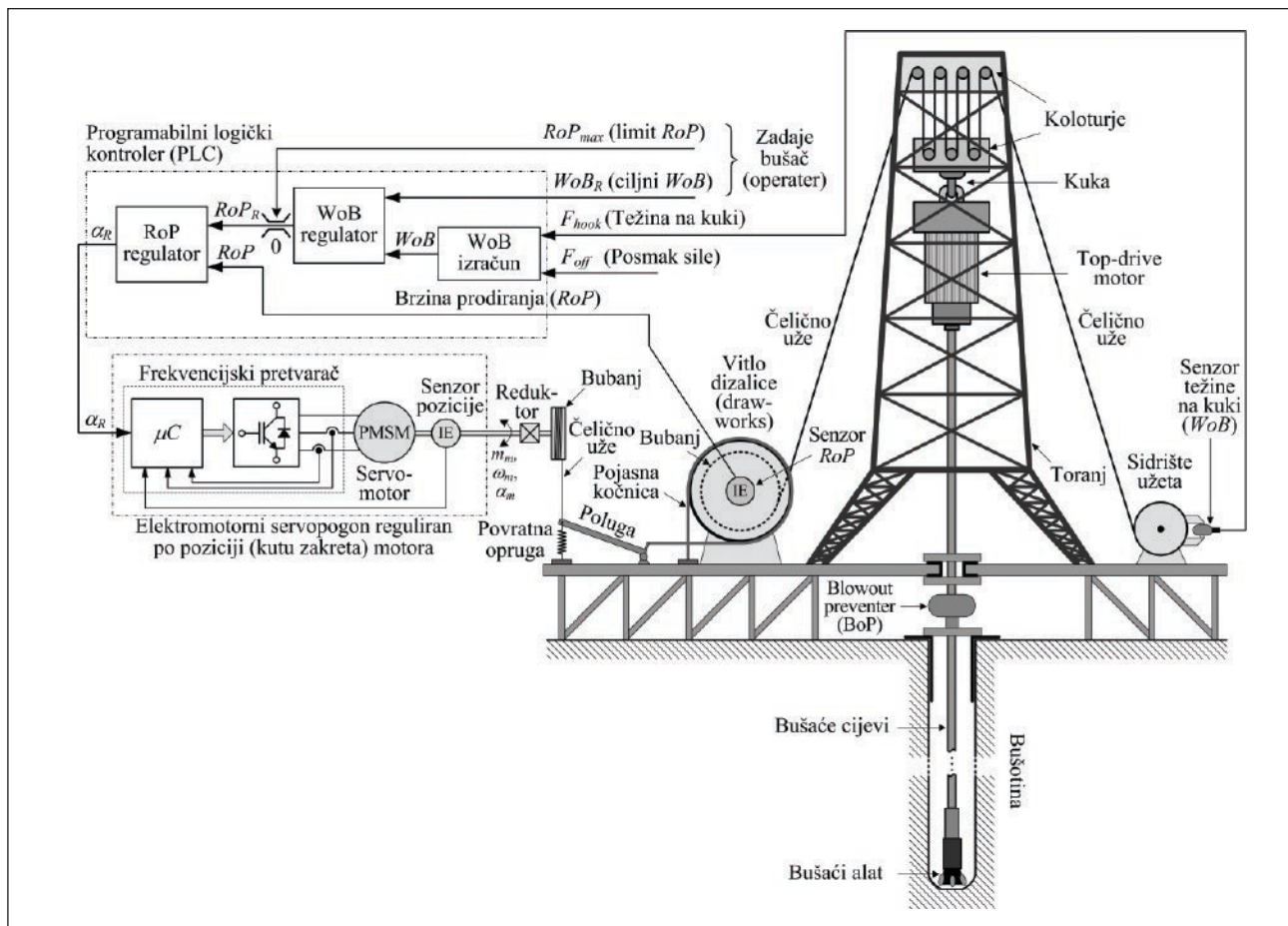
## 2. Predloženo rješenje sustava automatskog bušača

Kao što je spomenuto ranije, rješenja upravljanja procesom bušenja temeljena na pogonu dizalice bušačeg niza sa servo-aktuatorom polužnog mehanizma kočnice bubnja trebala bi biti konkurentnija u biskih smislu investicijskih troškova i minimalne invazivnosti zahvata na samoj bušačkoj garnituri. Dodatna prednost takvog elektromehaničkog sustava za upravljanje procesom bušenja je njegova inherentna sigurnost u radu u slučaju kvara servoaktuatora. Naime, takav sustav je uvijek konfiguriran tako da se kočnica aktivira (zakochi) kada servoaktuator polužnog mehanizma nije pod napajanjem. Naime, u tom slučaju se ne primjenjuje

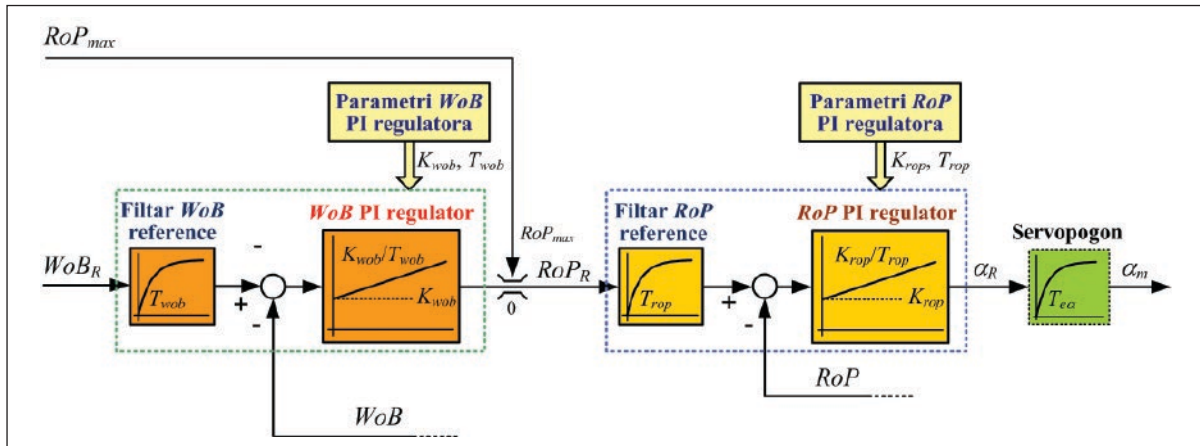
sila za podizanje poluge za otpuštanje kočnice, te zbog kombiniranog učinka težine poluge i dodatnog djelovanja ugrađene povratne opruge (vidi sliku 1) dolazi do zatezanja pojasne kočnice i sigurnog zakočenja bubnja vitla dizalice (National Oilwell Varco, 2020). Prema tome, na ovaj način moguće je brzo zaustavljanje bubnja vitla u kritičnim situacijama, na primjer kada bušači alat naiđe na „meke“ formacije stijena u kojima je moguće prekoračenje maksimalne brzina prodiranja (Kahraman, Bilgin i drugi, 2003). S druge strane, izvedba regulacijskog sustava pogona dizalice temeljena na mehaničkoj kočnici ima ograničenje u smislu smjera djelovanja jer je jedino moguće spuštavanje bušačeg niza (podizanje je moguće samo pomoću elektromotornog pogona vitla).

Uzimajući u obzir gore spomenute aspekte praktične izvedbe i inženjerske prakse uobičajene u industrijskim primjenama, sustav mehaničkog upravljanja bušenjem zasnovan na servoaktuatoru polužnog mehanizma kočnice treba imati sljedeće značajke (Pavković, Šprljan i drugi, 2021):

1. Neovisnu regulaciju sile nasjeda (WoB) i limitiranje brzine prodiranja (RoP) bušačeg alata, gdje je po-



Slika 1. Shematski prikaz kopsne bušaće garniture opremljene sustavom automatskog bušača s regulacijom sile nasjeda (WoB) i brzine prodiranja (RoP) temeljenih na servoaktuatoru polužnog mehanizma kočnice vitla dizalice.



Slika 2. Principni blokovski dijagram kaskadne strukture regulacije WoB/RoP.

- tonja opcija ključna za sigurnost rada pri nailasku na kaverne, odnosno slojeve stijena niske tvrdoće;
- Poželjno je koristiti razmjerno jednostavne i u industriji etablirane regulatore WoB i RoP, kao što je na primjer proporcionalno-integralni (PI) regulator, prvenstveno radi lakšeg snalaženja osoblja i jednostavnosti podešavanja parametara regulatora;
  - Preferira se jednostavnost implementacije regulacijskog sustava, tako da se strategija upravljanja može realizirati na tipičnom industrijskom programabilnom logičkom kontroleru (PLC-u).

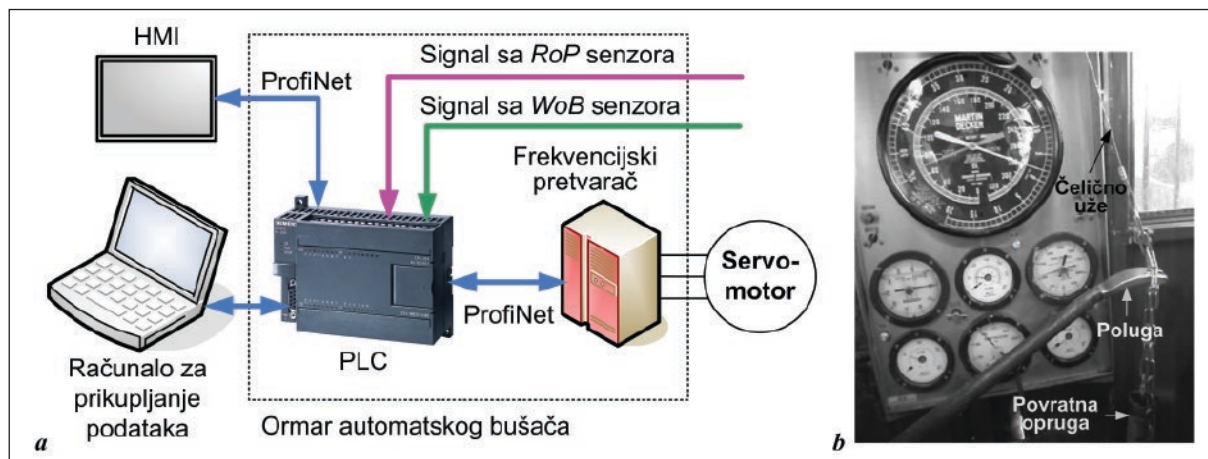
Predloženi sustav automatskog bušača vertikalnih bušotina uključuje u sebi regulaciju sile nasjeda (WoB) i brzine prodiranja (RoP) bušačkog alata, gdje su pojedini regulatori organizirani u takozvanu kaskadnu strukturu regulacije (Leonhard, 1996; Deur i Pavković, 2011), koja u usporedbi s drugim strukturama multi-varijabilnog upravljanja ima niz prednosti koje je čine pogodnom za industrijske primjene:

- Izlaz nadređenog regulatora predstavlja referentnu veličinu podređenom regulacijskom krugu. Limit izlaza nadređenog regulatora predstavlja, dakle, limit podređene regulacijske veličine (nadređeni regulator limitira podređenu reguliranu veličinu);
- Djelovanja poremećajnih veličina u kaskadnom sustavu regulacije se uvijek potiskuju na lokalnom nivou, a što je povoljno sa stanovišta nadređenog regulacijskog kruga jer lokalni regulator „rješava“ djelovanje lokalnog poremećaja te isti ne utječe na druge (više) razine regulacije;
- Sinteza i ispitivanje pojedinih regulacijskih krugova izvode se korak po korak, konkretno

od unutarnjih (podređenih) prema vanjskim (nadređenim);

- Jednostavno je preklapanje režima regulacije, odnosno onemogućenjem nadređenog regulatora se može izravno (predupravljačkim signalom) zadavati referenca (ciljna vrijednost) podređenom regulatoru.

Za konkretan slučaj kaskadne strukture WoB/RoP regulatora prikazanog na slici 2, WoB PI regulator prima referencu sile nasjeda  $WoB_R$  od operatera i mjerni signal (rekonstrukciju)  $WoB$  sa senzora težine tereta ovješeno na kuki, te posljedično zadaje komandu (referencu) brzine prodiranja  $RoP_R$  PI regulatoru brzine prodiranja (RoP). PI regulator brzine prodiranja dobiva signal povratne veze  $RoP$  (brzine vrtnje vitla) sa odgovarajućeg inkrementalnog davača impulsa (inkrementalnog enkodera, IE) instaliranog na bubnju vitla dizalice. Pritom inkrementalni enkoder mora zadovoljiti visoke sigurnosne zahtjeve protueksplozijske zaštite (za rad u Ex0 zoni) i općenito otežane uvjete rada (visok nivo IP zaštite). Na temelju reference  $RoP_R$  i signala povratne veze  $RoP$ , PI regulator brzine prodiranja zadaje komandu pozicije  $\alpha_R$  elektromotornog servopogona koji precizno pozicionira rotor elektromotora za namatanje čeličnog užeta u sklopu mehanizma poluge kočnice te tako napreže povratnu oprugu, odnosno otpušta i zateže pojasnu kočnicu na bubnju vitla dizalice (slika 1). U svrhu sprječavanja prebrzog spuštanja bušačkog niza prilikom nailaska na „mekše“ slojeve stijena ili kaverne na dnu bušotine, ciljna (referentna) vrijednost brzine prodiranja ( $RoP_R$ ) se eksplicitno ograničava (limitira) zadavanjem odgovarajuće maksimalne vrijednosti (limita) brzine prodiranja  $RoP_{max}$  od strane operatera (slika 2). Referentne veličine PI regulatora WoB i RoP se



Slika 3. Principna shema spajanja upravljačkih uređaja u sklopu sustava automatskog bušača (a) i realizacija polužnog servomehanizma kočnice na garnituri N-402 (b).

propuštaju kroz niskopropusne filtre kako bi se spriječila intenzivna forsiranja izlaza regulatora u slučaju naglih promjena referenci sile nasjeda  $WoB_R$  i brzine prodiranja  $RoP_R$ , pri čemu je vremenska konstanta filtra identična integracijskoj vremenskoj konstanti PI regulatora (Leonhard, 1996). Detaljan postupak podešavanja PI regulatora sile nasjeda i brzine prodiranja, odnosno postavljanja iznosa proporcionalnih pojačanja  $K_{wob}$  i  $K_{rop}$ , te integracijskih vremenskih konstanti  $T_{wob}$  i  $T_{rop}$  opisuju Pavković, Milutinović i drugi (2014).

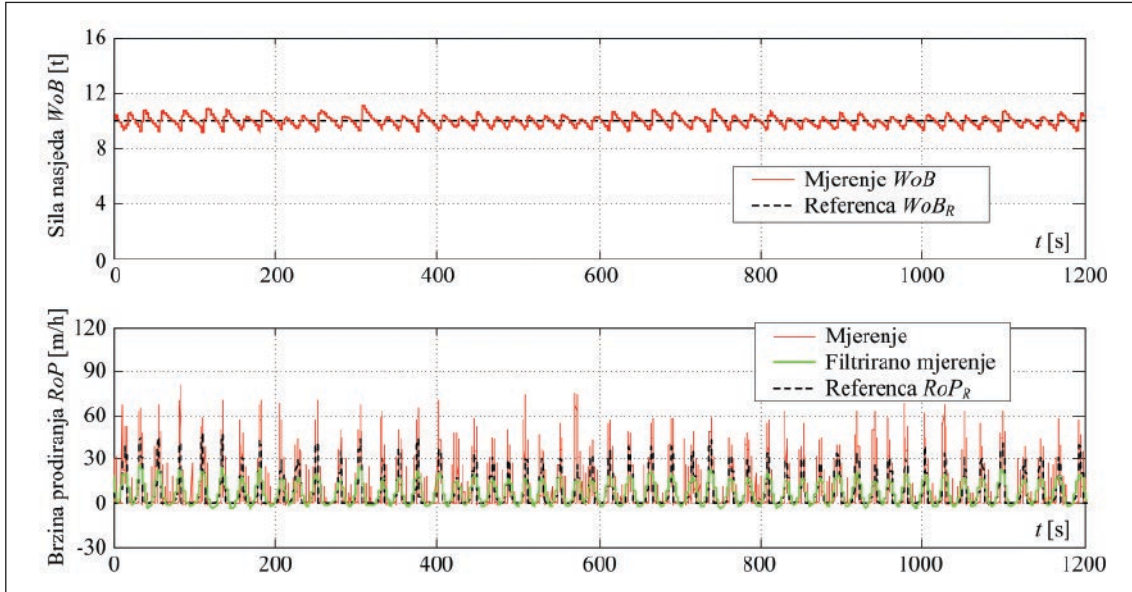
### 3. Rezultati ispitivanja na terenu

Predloženi sustav regulacije  $WoB/RoP$  implementiran je i ispitan na bušačkoj garnituri N-402 tvrtke CROSCO u ožujku 2014. godine. U tu svrhu je u kabini bušača ugrađen ormar s upravljačkom opremom čija je načelna shema prikazana na slici 3a. U upravljačkom ormaru nalazi se programabilni logički kontroler (PLC) koji prikuplja signale sa  $WoB$  i  $RoP$  senzora i u kojem su implementirani PI regulatori  $WoB$  i  $RoP$  u kaskadnoj strukturi, kako je objašnjeno ranije. Na temelju regulacijskog algoritma PLC zadaje frekvencijskom pretvaraču komandu pozicije servomotora preko ProfiNet komunikacije, dok se ključne varijable (mjerni signali  $WoB/RoP$ ) prikazuju na operaterskom panelu (HMI uređaju) koji također služi za zadavanje ciljne vrijednosti (reference)  $WoB$  i maksimalne brzine spuštanja alata (limita  $RoP$ ) od strane operatera (bušača). Bušenje je provedeno na dubinama od približno 1500 m, što odgovara srednjem rasponu dubina bušenja za danu bušaču garnituru (CROSCO, 2020). Fotografija mehatroničkog sustava polužnog mehanizma kočnice u kabini bušača prikazana je na

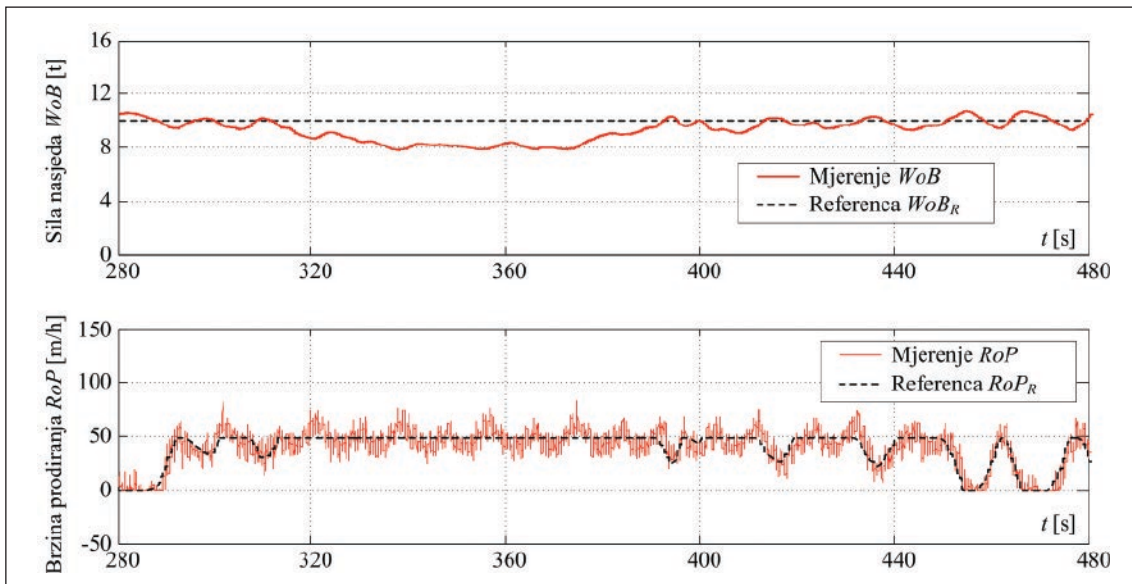
slici 3b, gdje se vidljiv način spajanja čeličnog užeta koje se pomoću servomotora namata na prigradenu koloturu (koja nije prikazana na slici 3b) te povratne opruge za vraćanje poluge kočnice u siguran (zakodeni) položaj kod nestanka napajanja.

Slika 4 prikazuje odziv  $WoB/RoP$  regulacijskog sustava uz konstantnu referencu sile nasjeda alata  $WoB_R = 10$  t. Rezultati pokazuju da regulacijski sustav dobro prati zadanu vrijednost sile nasjeda alata uz relativno male iznose njenih varijacija, gdje srednje kvadratno odstupanje (engl. Mean Squared Error, MSE) od zadane (referentne) vrijednosti  $WoB_R = 10$  t iznosi 0.26 t, dok je vršno odstupanje od zadane vrijednosti 0.85 t. Srednja vrijednost brzine prodiranja ( $RoP$ ) u stacionarnom stanju, dobivena iz niskopropusno filtriranog signala  $RoP$  iznosi oko 10 m/h za zadane uvjete u bušotini. Ovdje treba naglasiti da je gibanje bubnja dizalice impulsnog karaktera, a što je posljedica nelinearne karakteristike trenja pojasne kočnice, odnosno nezanemarive razlike između statičkog i Coulombovog (kinetičkog) trenja kočnice. Potonje svojstvo trenja pojasne kočnice povoljno djeluje u sigurnosnom smislu. Preciznije, uslijed većeg iznosa statičkog od kinetičkog trenja sprječava se proklizavanje bubnja vitla nakon zaustavljanja njegove rotacije kada je pojasna kočnica zategnuta.

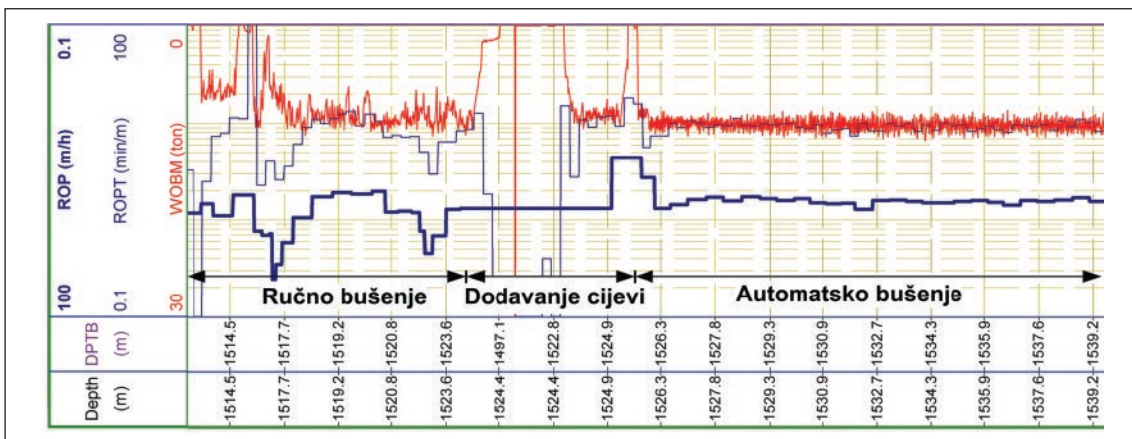
Na slici 5 prikazani su odzivi  $WoB/RoP$  regulacijskog sustava za slučaj iznenadnog nailaska bušačkog alata na sloj karakteriziran manjim otporom prodiranja (tj. „mekšu“ stijenu) na dnu bušotine. Rezultati pokazuju da izlaz regulatora  $WoB$  (ciljna vrijednost  $RoP_R$ ) vrlo brzo postaje limitiran (uz limit vrijednost  $RoP_{max} = 50$  m/h) nakon nailaska na „mekšu“ formaciju stijena ( $t = 300$  s), što zauzvrat rezultira manjim iznosom  $WoB$ , odnosno odstupanjem od ciljne vrijed-



Slika 4. Rezultati testa na garnituri N-402 uz referencu sile nasjeda od 10 tona uz konzistentan otpor prodiranju alata.



Slika 5. Rezultati testa na garnituri N-402 uz referencu sile nasjeda od 10 tona uz iznenadno smanjenje otpora prodiranju alata (nailazak na „mekši“ sloj stijena).



Slika 6. Rezultati dugotrajnog snimanja na garnituri N-402 koji obuhvaćaju period ručnog bušenja, izmjenu/dodavanje bušačkih cijevi i uključivanje automatskog bušača.

nosti ( $WoB_R = 10$  t). Nakon što alat ponovno naiđe na tvrđu stijenu ( $t > 440$  s), regulator  $WoB$  vrlo brzo izlazi iz limita i uspostavlja se učinkovita kontrola  $WoB$  u smislu stacionarne točnosti praćenja zadane vrijednosti  $WoB_R = 10$  t.

Konačno, performanse  $WoB/RoP$  regulacijskog sustava potvrđuju i dugoročna mjerenja  $WoB$  i  $RoP$  dobivena od strane geološke službe na bušotini, a koja su prikazana na slici 6. Rezultati pokazuju da predloženi  $WoB/RoP$  regulacijski sustav učinkovitije i konzistentnije regulira  $WoB$  u usporedbi s ručnim bušenjem (gdje polugom kočnice upravlja čovjek), što za posljedicu ima konzistentnije prodiranje alata i manje varijacije  $RoP$ .

## 4. Zaključak

U radu je prikazan rezultat razvoja automatiziranog sustava bušenja temeljenog na mehatroničkom sustavu polužnog servomehanizma pojasne kočnice bubnja vitla dizalice bušačeg niza. Cjelokupni automatizirani sustav bušenja uključuje pozicijski-regulirani elektromotorni servopogon polužnog mehanizma kočnice, te regulatore brzine prodiranja ( $RoP$ ) i sile nasjeda alata ( $WoB$ ) organizirane u takozvanu kaskadnu regulacijsku strukturu, uz limit brzine prodiranja eksplicitno zadan od strane operatera.

Predloženi mehatronički sustav (servomehanizam) kočnice bubnja vitla dizalice i regulacijski su-

stav sile nasjeda i brzine prodiranja alata ( $WoB/RoP$ ) verificirani su opsežnim terenskim ispitivanjima na bušačoj garnituri N-402 tvrtke CROSCO u realnim radnim uvjetima. Rezultati su pokazali da predloženi  $WoB/RoP$  regulacijski sustav postiže zadovoljavajuće performanse regulacije  $WoB/RoP$  u smislu točnosti regulacije i malih varijacija sile nasjeda ( $WoB$ ) u odnosu na zadanu vrijednost, istovremeno sprječavajući nekontrolirano odmotavanje čeličnog užeta u slučaju nailaska na „mekšu“ stijenu kroz limitiranje brzine prodiranja ( $RoP$ ). Konačno, dugotrajni terenski testovi pokazali su da predloženi sustav  $WoB/RoP$  regulacije rezultira manjim varijacijama  $WoB$  u usporedbi s djelovanjem ljudskog operatera, što također rezultira ujednačenijim prodiranjem alata, to jest konzistentnijim brzinama prodiranja ( $RoP$ ) i njenim manjim varijacijama.

## Zahvala

Ovom prilikom se zahvaljujemo tvrtki CROSCO – naftni servisi d.o.o. na pruženoj logističkoj podršci tijekom razvoja sustava automatskog bušenja, a koji je financijski podržan od strane tvrtki HELB d.o.o. i Nev-El d.o.o. kroz razvojno-istraživački projekt „Razvoj regulacijskog sustava automatskog naftnog bušenja“. Posebno se zahvaljujemo tvrci Nev-El d.o.o. na stručnoj pomoći u provedbi terenskih ispitivanja.

## Literatura

1. AKER SOLUTIONS: „Drilling Technologies Brochure“ (<http://www.akersolutions.com>) [pristupljeno 20.12.2020.]
2. CANUDAS-DE-WIT, C., RUBIO, F. R. & CORCHERO, M. A.: D-OSKIL: A New Mechanism for Controlling Stick-Slip Oscillations in Oil Well Drillstrings, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16, 6, 1177–1191.
3. CROSCO NATIONAL 402 1000 HP Drilling Rig, <https://crosco.com/services/drilling/> [pristupljeno 20.12.2020]
4. DEUR, J. & PAVKOVIĆ, D.: Fundamentals of Electrical Drive Controls. – In UNESCO-EOLSS Joint Committee (Ed.): UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems, Ch. 6.39.21, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2011, 59 p.
5. FOSS, B.: Process Control in Conventional Oil and Gas Fields – Challenges and opportunities. Control Engineering Practice, 2012, 20, 10, 1058-1064.
6. KAISER, M. J. & SNYDER, B. F.: The Offshore Drilling Industry and Rig Construction in the Gulf of Mexico. Lecture Notes in Energy 8, Springer-Verlag, London, UK, 2013, 367 p.
7. KAHRAMAN, S., BILGIN, N. & FERIDUNOGLU, C.: Dominant Rock Properties Affecting the Penetration Rate of Percussive Drills, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40, 5, 711–723.
8. LEONHARD, W.: Control of Electrical Drives, 2<sup>nd</sup> ed. Springer-Verlag, Berlin, 1996, 420 p.
9. LYONS, W. C. & PLISGA, G. J.: Standard handbook of petroleum and natural gas engineering, 2<sup>nd</sup> ed., Houston, Texas, Gulf Professional Publishing, 2005, 1569 p.
10. NATIONAL OILWELL VARCO: Wildcat ADS Automated Drilling System (<http://www.nov.com>) [pristupljeno 20.12.2020.]

11. PAVKOVIĆ, D., ŠPRLJAN, P., CIPEK, M. & KRZNAR, M.: Cross-Axis Control System Design for Borehole Drilling based on Damping Optimum Criterion and utilization of Proportional-Integral Controllers, *Optimization and Engineering*, Optimization and engineering, 2021, 22, 1, 51-81.
12. PAVKOVIĆ, D., MILUTINOVIĆ, M., KRANJČEVIĆ, N. & DEUR, J.: Development of Oil-Drilling Weight-on-Bit Control System Based on an Electromechanical Drum Brake Actuator, Project Report 05/12/2014, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Zagreb, 2014, 52 p.
13. POWER, D. J. & Glaser, G. P.: Automatic Drilling System, US Patent No. 7059427, 2006.
14. RAY, J., Well Drilling Control System, US Patent No. 6994172, 2006.
15. ŠPRLJAN, P., PAVKOVIĆ, D., CIPEK, M., KLAIĆ, M., STAROVEŠKI, T., & KOLAR, D.: Automation Systems Design and Laboratory Prototyping Aimed at Mature Petroleum Drilling Rig Retrofitting, *Tehnički vjesnik/Technical Gazette*, 2020, 27, 1, 229-236.
16. WU, S., LI, J. & LIU, L.: In Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Engineering and Technology „Modeling and Compound Control of Disk Brake Automatic Drilling System“, Chengdu, China, Vol. 3, 45-49, 2010.
17. ZHAO, Q., WANG, F., WANG, W. & DENG, H.: In Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, „Adaptive Fuzzy Control Technology for Automatic Oil Drilling System“, Jinan, China, 2123-2127, 2007.