

NEKI PROBLEMI DINAMIKE I ČVRSTOĆE MAŠINA VISOKIH PERFORMANSI

Prof. dr Srđan Bošnjak*
Mašinski fakultet, Beograd

Neprekidna eksploatacija u vrlo teškim radnim uslovima dovodi do relativno čestih otkaza podsistema rotornih bagera i pretovarnih mostova za uglj. Visoko mesto među uzročnicima pomenutih otkaza zauzimaju propusti projektanata – greške u analizi opterećenja, modeliranju i analizi odziva. U radu je izložen originalan postupak identifikacije opterećenja izazvanog otporom kopanja, koji obuhvata sve relevantne konstrukcione parametre, kao i parametre režima rada mašine. Njegova validacija izvršena je merenjima u realnim eksploatacionim uslovima. Osim toga, izložen je i postupak formiranja dinamičkog modela nadgradnje rotornih bagera. On omogućava da se sa dovoljnom tačnošću analizira njen odziv i utvrdi nivo značajnosti parametara pojedinih podsistema. Prezentiran je redizajn obrtne platforme bagera i noseće konstrukcije pretovarnog mosta za uglj. Rezultati merenja i višegodišnja eksploatacija nedvosmisleno su potvrdili uspešnost primenjenog koncepta redizajna.

Ključne reči: rotorni bager, pretovarni most, otpor kopanja, dinamika, čvrstoća

UVOD

Rotorni bageri i pretovarni mostovi za uglj, slike 1 i 2, zbog svojih izuzetnih performansi i kapaciteta pre svega, predstavljaju vitalne delove sistema površinske eksploatacije, odnosno, sistema unutrašnjeg transporta i dopreme uglja u termoelektranama. Otkazi pomenutih klasa mašina [1,2,3,4,5,6], osim direktne materijalne štete, prouzrokuju i indirektnu štetu nastalu zasojem sistema. Ona je, često, znatno veća od direktne materijalne štete. Na primer, jedan sat zastoja rotornog bagera na površinskim kopovima RB »Kolubara« tretira se kao gubitak od 8,000 do 14,000 €, u zavisnosti od kapaciteta bagera i pripadajućeg sistema eksploatacije.

Mašine za kontinualni iskop/zahvatanje raslog/rastresenog tla, izložene su dejstvu opterećenja izrazito dinamičkog karaktera, što je, pre svega, posledica:

- periodičnog ulaska/izlaska kašika/vedrica iz zahvata sa tlom,
- neuravnoteženosti pogonskih mehanizama, zahvatnih uređaja i obrtnih delova trakastih transporterata i
- udara komada koji mogu da se jave tokom pražnjenja kašika/vedrica.

Kada je reč o opterećenjima periodičnog kara-

ktera, dominantan uticaj na odziv noseće konstrukcije i mehanizama razmatranih klasa mašina ima opterećenje izazvano interakcijom mašine i tla - otpor kopanja.

Analiza dinamičkog ponašanja razmatrane klase mašina je izuzetno značajna, pre svega, zbog



Slika 1. Rotorni bager Takraf SRs 1200

moguće pojave rezonantnih stanja. Osim toga, ona pruža osnovu za analizu naponskih stanja konstrukcionih elemenata i određivanje njihovog veka.

Dinamičko ponašanje mašina za kontinualni iskop / zahvatanje, pod dejstvom pobude iza-



Slika 2. Pretovarni most za uglj Metalna 300

zvane otporom kopanja, zavisi od relativno velikog broja faktora koji mogu da se svrstaju u dve grupe. Prvu grupu čine dinamičke karakteristike noseće konstrukcije i mehanizama, a drugu, karakteristike tla. Dakle analiza dinamičkog ponašanja razmatrane klase mašina zahteva da se prethodno, na odgovarajući način, reše dva problema i to:

- problem modeliranja spoljašnjeg opterećenja izazvanog otporom kopanja i
- problem formiranja dinamičkog modela mašine ili njenog reprezentativnog pod-sistema.

Osim rešavanja problema određivanja spoljašnjeg opterećenja, provera čvrstoće zahteva i formiranje odgovarajućih proračunskih modela nosećih struktura.

MODELIRANJE OPTEREĆENJA IZAZVANOG OTPOROM KOPANJA

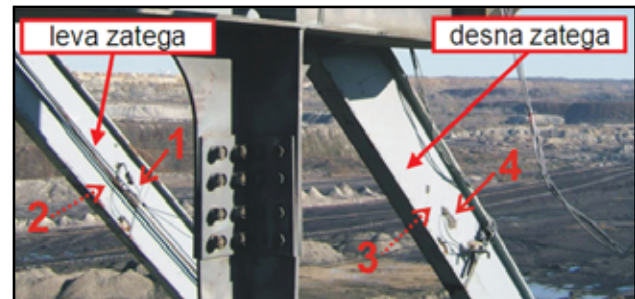
Identifikacija spoljašnjeg opterećenja izazvanog otporom kopanja, zahteva rešavanje tri problema i to:

- problema određivanja dimenzija poprečnog preseka odrezaka;
- problema izbora i određivanja specifičnog otpora kopanja;
- problema određivanja položaja komponenti otpora kopanju.

Kada je reč o problemu određivanja dimenzija odrezaka, postojeća literatura može da se svrsta u dve grupe. Prvu grupu, reference [7,8,9,10,11,12], karakterišu apsolutno kruti modeli radnog uređaja. U radu [13] dat je kritički osvrt na postojeće postupke kinematičke analize procesa rezanja tla i prezentirana procedura simulacije opterećenja izazvanog otporom kopanja na originalnom modelu radnog uređaja. On obuhvata sve relevantne konstrukcije

parametre i parametre režima rada, kao i stohastičnost specifičnog otpora kopanja.

Validacija izloženog postupka izvršena je merenjem u realnim radnim uslovima, slike 3, 4 i 5.



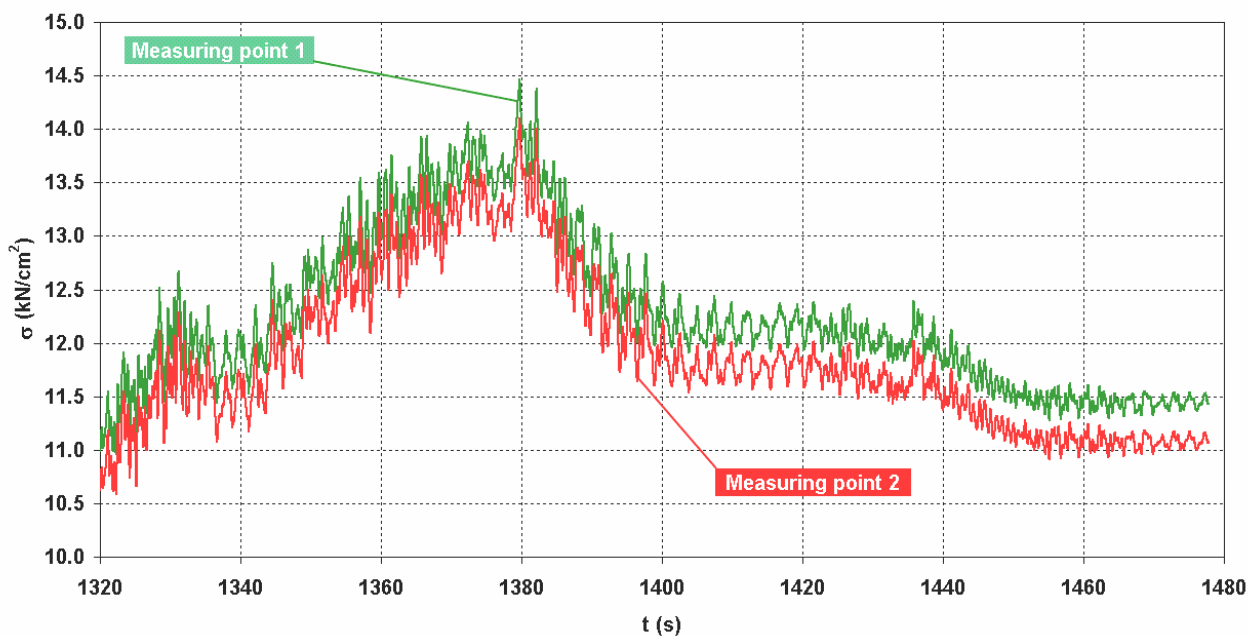
Slika 3. Položaj mernih mesta na zategama rotornog bagera Takraf SRs 1200

Upoređivanjem karakterističnih vrednosti dijagrama prikazanih na slici 5, zaključuje se da simulacioni model daje rezultate čija je tačnost dovoljna, sa inženjerske tačke gledišta. Deterministički model daje dobre rezultate kada je reč o frekvenciji pobude. Stohastički model daje rezultate koji su bliski izmerenim vrednostima. Odstupanja koja se javljaju tumače se uticajem stanja reznih elemenata, odlamanjem tla u zoni izlaska kašike iz zahvata, kao i činjenicom da u razmatranom slučaju nije uzeta u obzir deformabilnost strukture.

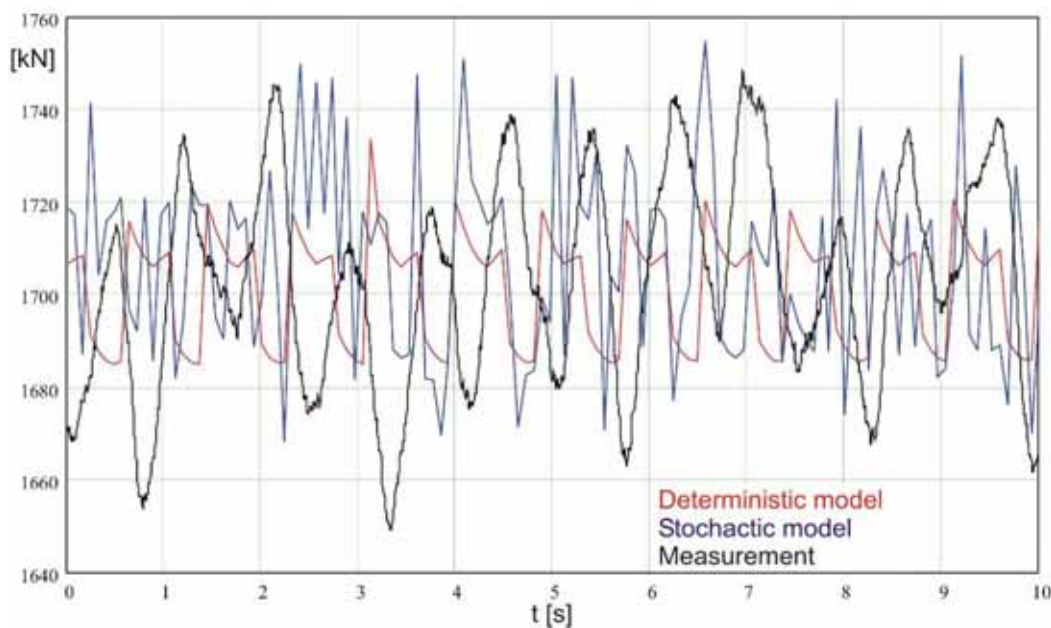
DINAMIČKI MODELI NADGRADNJE ROTORNIH BAGERA

U monografiji [14] dati su dinamički modeli nadgradnje rotornih bagera ЭРШР – 1600, slika 6, ЭРГ – 1600, slika 7 i ЭРГ – 400, slika 8, u vertikalnoj ravni. Oni obuhvataju i deformabilnost strukture gornje gradnje, koja je kod bagera ЭРШР – 1600 i ЭРГ – 1600 konstrukciono rešena tako da njeni nosači mogu da se tretiraju kao aksijalne opruge. U dinamičkom modelu bagera ЭРГ – 400 deo strukture gornje gradnje posmatra se kao apsolutno krut, a njenu deformabilnost simulira opruga krutosti c5, slika 8.

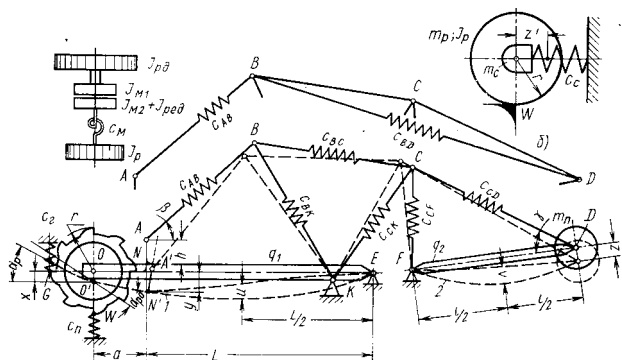
U literaturi [15] detaljno je izložen postupak modeliranja strukture nadgradnje rotornog bagera Krupp SchRs 1760, slika 9. Autor citirane literature je, prihvatajući osnovne postavke koje su date u [14], razmatrao oscilovanje strukture stuba sa konzolom protivtega i strelom rotora u vertikalnoj ravni, na modelima prikazanim na slikama 10 i 11. U radovima [13,16] izložen je postupak formiranja prostornih dinamičkih modela podstruktura gornje gradnje rotornog bagera



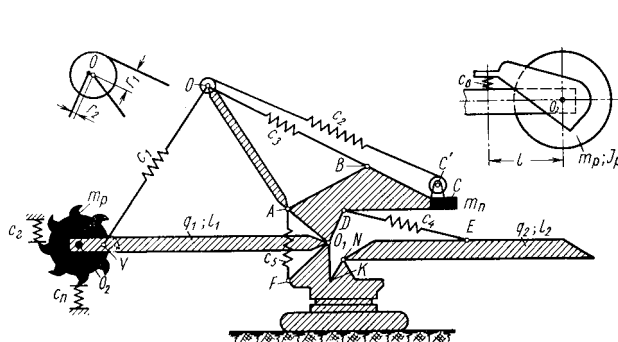
Slika 4. Karakteristični segmenti dijagrama promene napona na mernim mestima 1 i 2 [3]



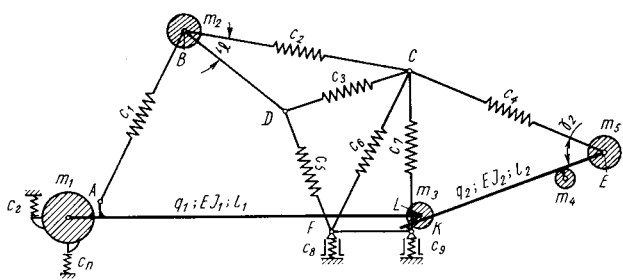
Slika 5. Uporedni prikaz dijagrama sila u zatezi [3]



Slika 6. Model nadgradnje bagera ЭПШР-1600 [14]



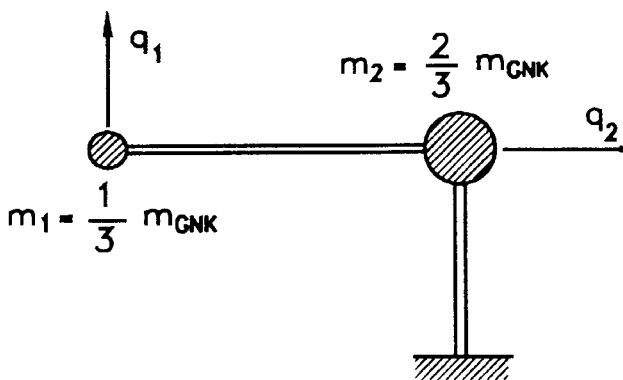
Slika 7. Model nadgradnje bagera ЭПГ-1600 [14]



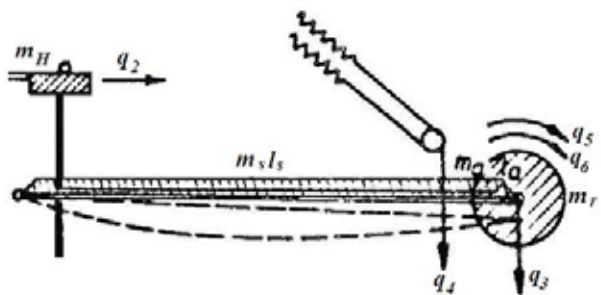
Slika 8. Model nadgradnje bagera ЭПГ – 400 [14]



Slika 9. Rotorni bager Krupp SchRs 1760

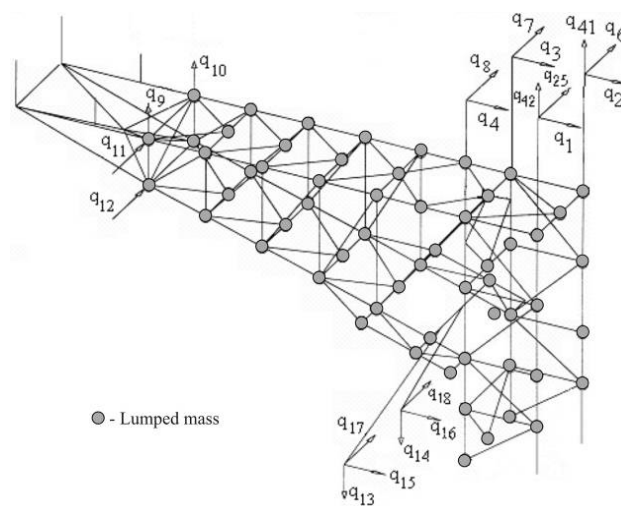


Slika 10. Rotorni bager Krupp SchRs 1760 - model stuba sa konzolom protivtega prema [15]

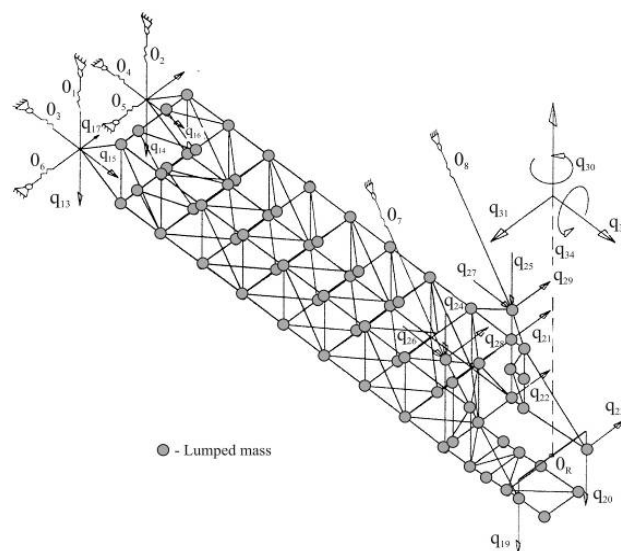


Slika 11. Rotorni bager Krupp SchRs 1760 - model strele rotora prema [15]

KRUPP SchRS 1760, slike 12 i 13. Njihovom sintezom formiran je prostorni dinamički model celokupne nadgradnje, slika 14. Ovako razvijen model može da se koristi za rešavanje različitih problema dinamike rotornih bagera.



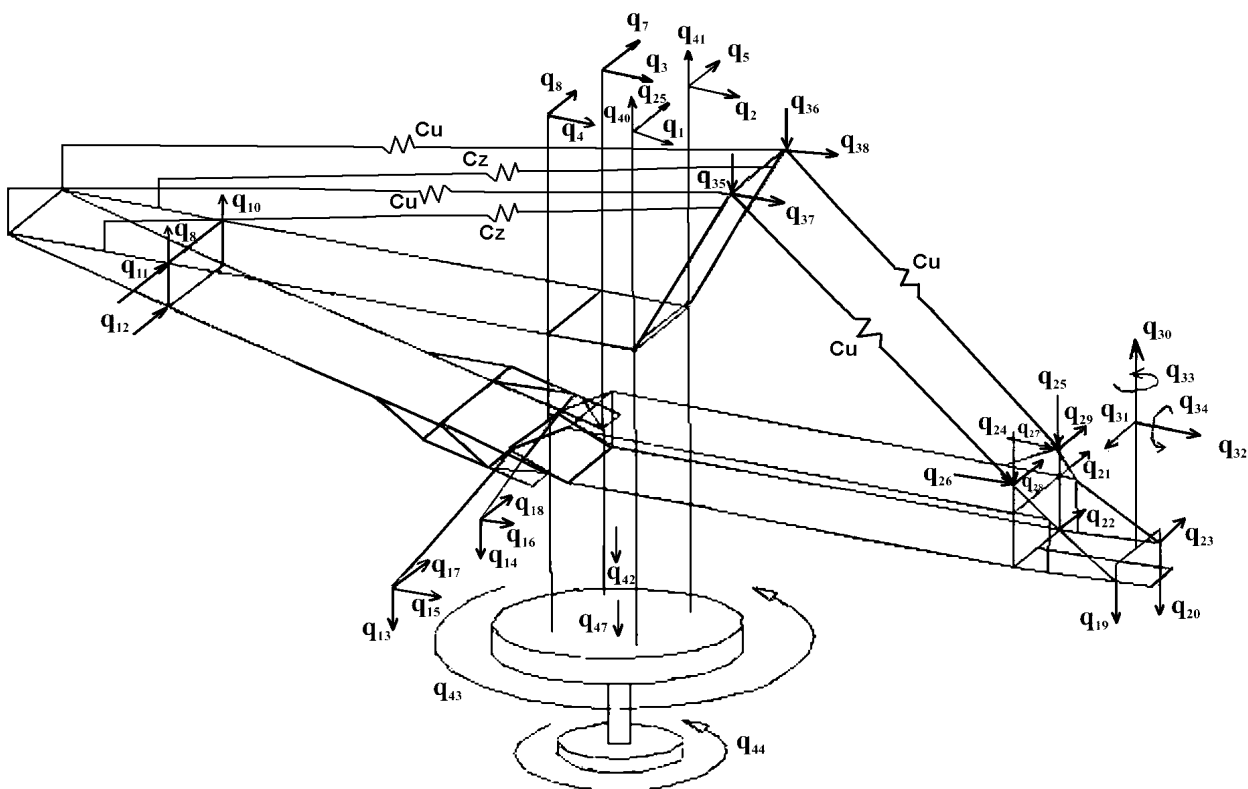
Slika 12. Rotorni bager Krupp SchRs 1760 - model stuba sa konzolom protivtega prema [13, 16]



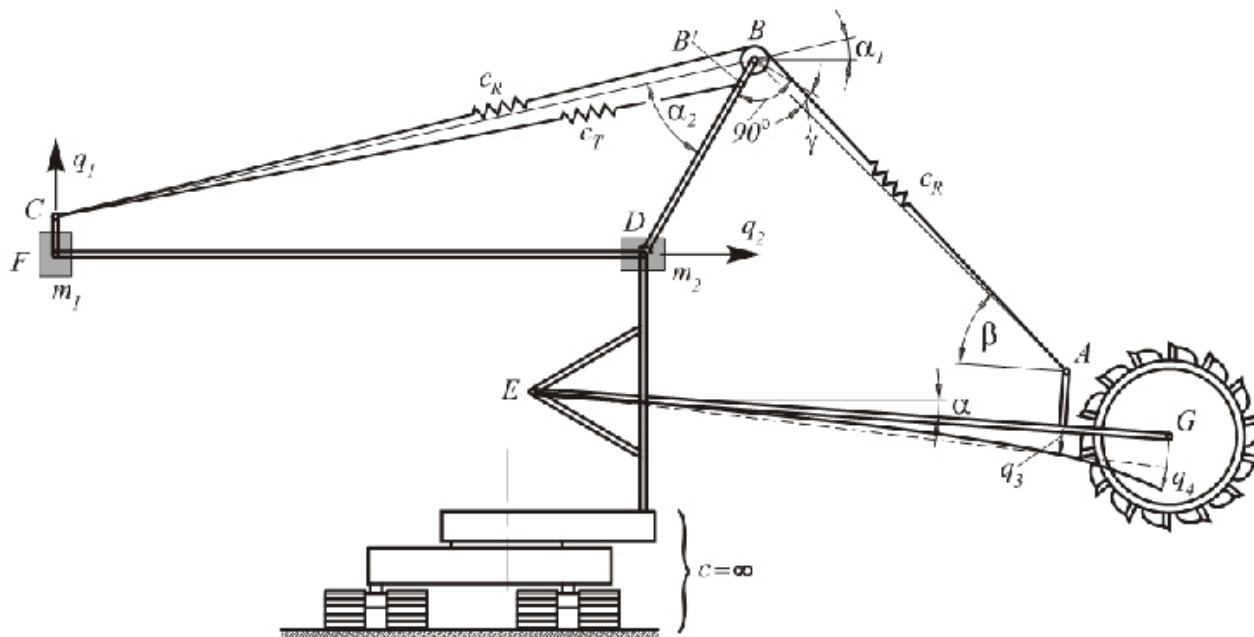
Slika 13. Rotorni bager Krupp SchRs 1760 - model strele rotora prema [13, 16]

ODZIV NADGRADNJE BAGERA KRUPP SchRs 1760 U VERTIKALNOJ RAVNI

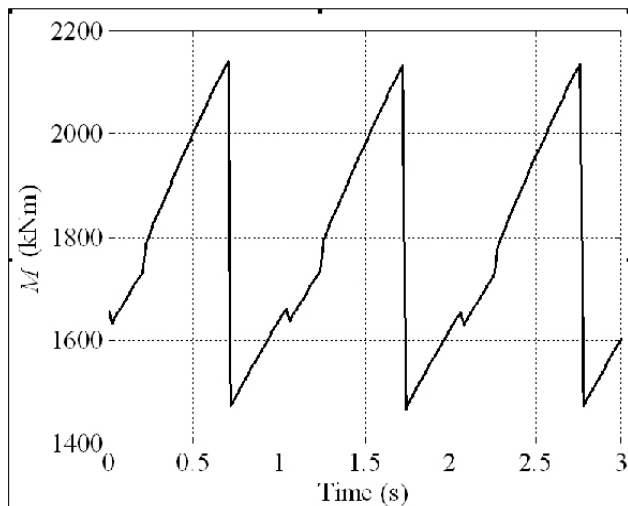
Redukcijom prostornog modela, slika 14, formiran je ravanski model nadgradnje, slika 15. Komponente opterećenja izazvanog otporom kopanja (vertikalna i horizontalna sila i moment otpora kopanja, slika 16) određene su primenom softvera RADBAG, razvijenog na osnovu originalnog modela prezentiranog u [13, 17].



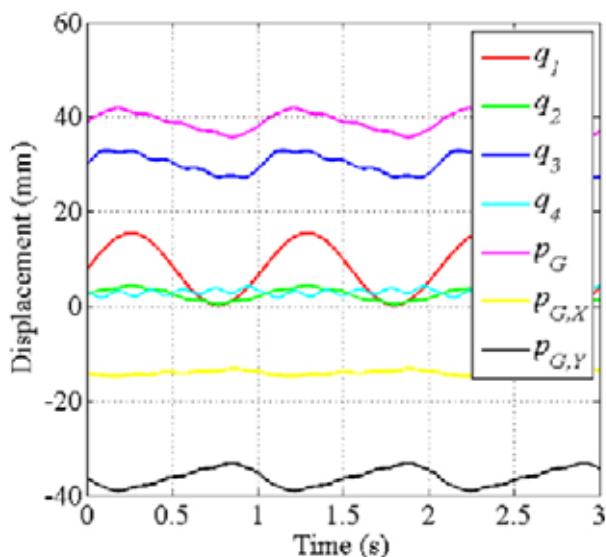
Slika 14. Prostorni dinamički model nadgradnje rotornog bagera Krupp SchRs 1760 [13,16]



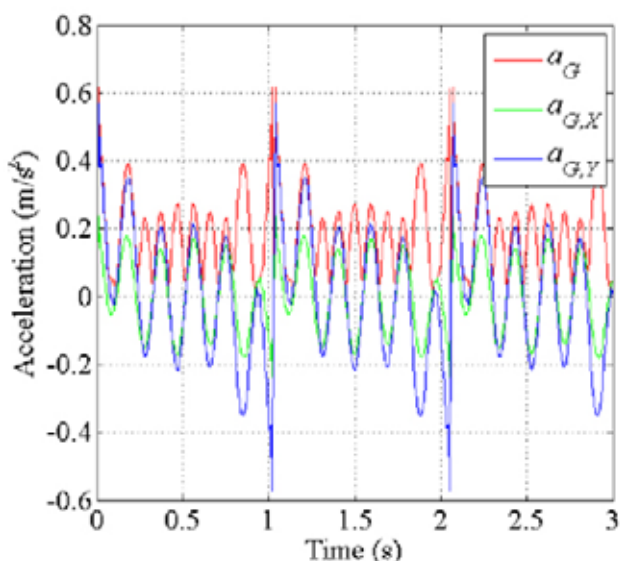
Slika 15. Redukovani dinamički model nadgradnje rotornog bagera Krupp SchRs 1760 u vertikalnoj ravni



Slika 16. Dijagram momenta otpora kopanja



Slika 17. Dijagrami generalisanih koordinata



Slika 18. Dijagrami ubrzanja središta masa rotora

Odziv nadgradnje za slučaj da se strela rotora nalazi u horizontalnom položaju prikazan je na slikama 17 i 18.



Slika 19. Lokacije i izgled pukotina donje ploče i vertikalnog lima obrtne platforme – spolja [3]



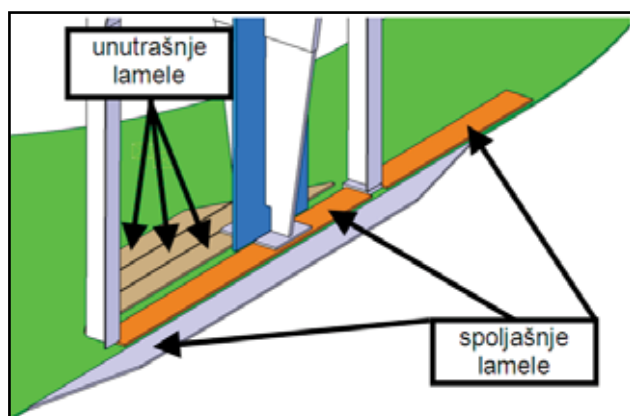
Slika 20. Lokacije i izgled pukotina donje ploče i vertikalnog lima obrtne platforme – iznutra

REDIZAJN OBRTNE PLATFORME ROTORNOG BAGERA TAKRAF SRs 1200

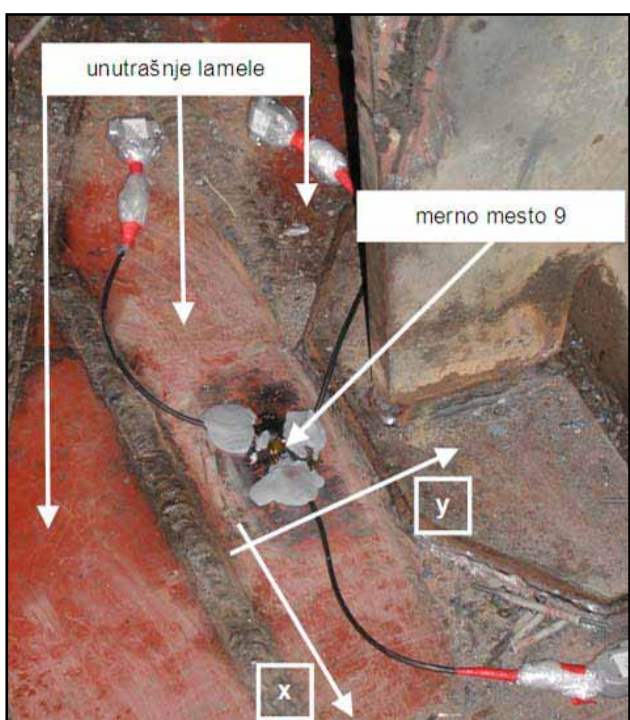
Višegodišnja eksploatacija u veoma teškim radnim uslovima dovela je do pojave prslina i pukotina u zonama oslanjanja zadnjih stubova nadgradnje, slike 19 i 20. Konačnoelementnom analizom utvđena je veoma izražena koncentracija napona u kritičnoj zoni [1,3,18]. Ona je izazvana tehnološkim otvorom (korišćen tokom izrade obrtne platforme) i isuviše ranim završetkom ojačanja donje ploče, slika 21. Redizajnom strukture platforme, slika 22, uz minimalni dodatak mase, ostvaren je znatno bolji odziv na spoljašnje opterećenje (naponi su manji od dopuštenih), što je potvrđeno i merenjima u eksploatacionim uslovima, slike 23 i 24.



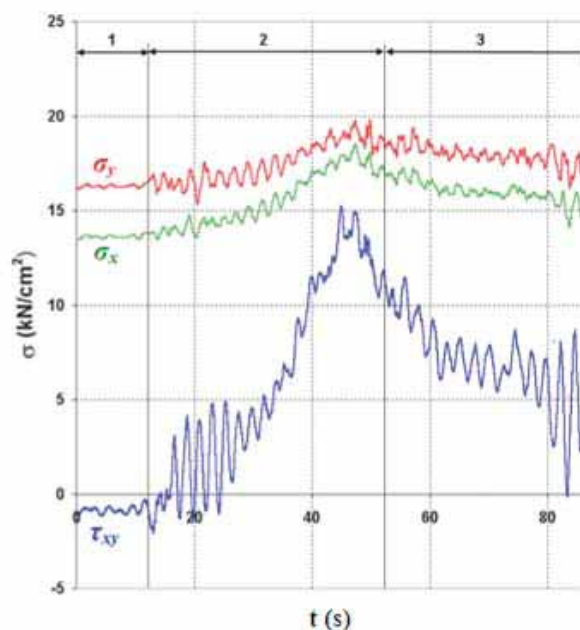
Slika 21. Detalj polja napona u kritičnoj zoni, $\sigma_{x,max}=32,1 \text{ kN/cm}^2$



Slika 22. 3D model redizajnirane kritične zone



Slika 23. Merno mesto 9 [3]



Slika 24. Promena napona u kritičnoj zoni nakon rekonstrukcije [3]

REDIZAJN NOSEĆE KONSTRUKCIJE PRETOVARNOG MOSTA ZA UGALJ M300

Četiri pretovarna mosta sa elevatorima, slika 25, čine okosnicu sistema dopreme uglja u termoelektrani „Kolubara“ Veliki Crljeni. Pri ekstremnom zakošenju, dolazilo je do izvijanja kosnika krute noge, što je za posledicu imalo kolaps strukture pretovarnog mosta.

Analiza opterećenja izazvanog otporom zahvatanja materijala izvedena je primenom originalnog postupka izloženog u [19], slike 26 i 27.

Pri zakošavanju, najveći proračunski naponi javljaju se u kosnicima krute noge – u zategnutom kosniku $16,7 \text{ kN/cm}^2$, a u pritisnutom kosniku $17,7 \text{ kN/cm}^2$, slika 28. Maksimalno pomeranje strukture javlja se u zoni elastične noge, slika 29.

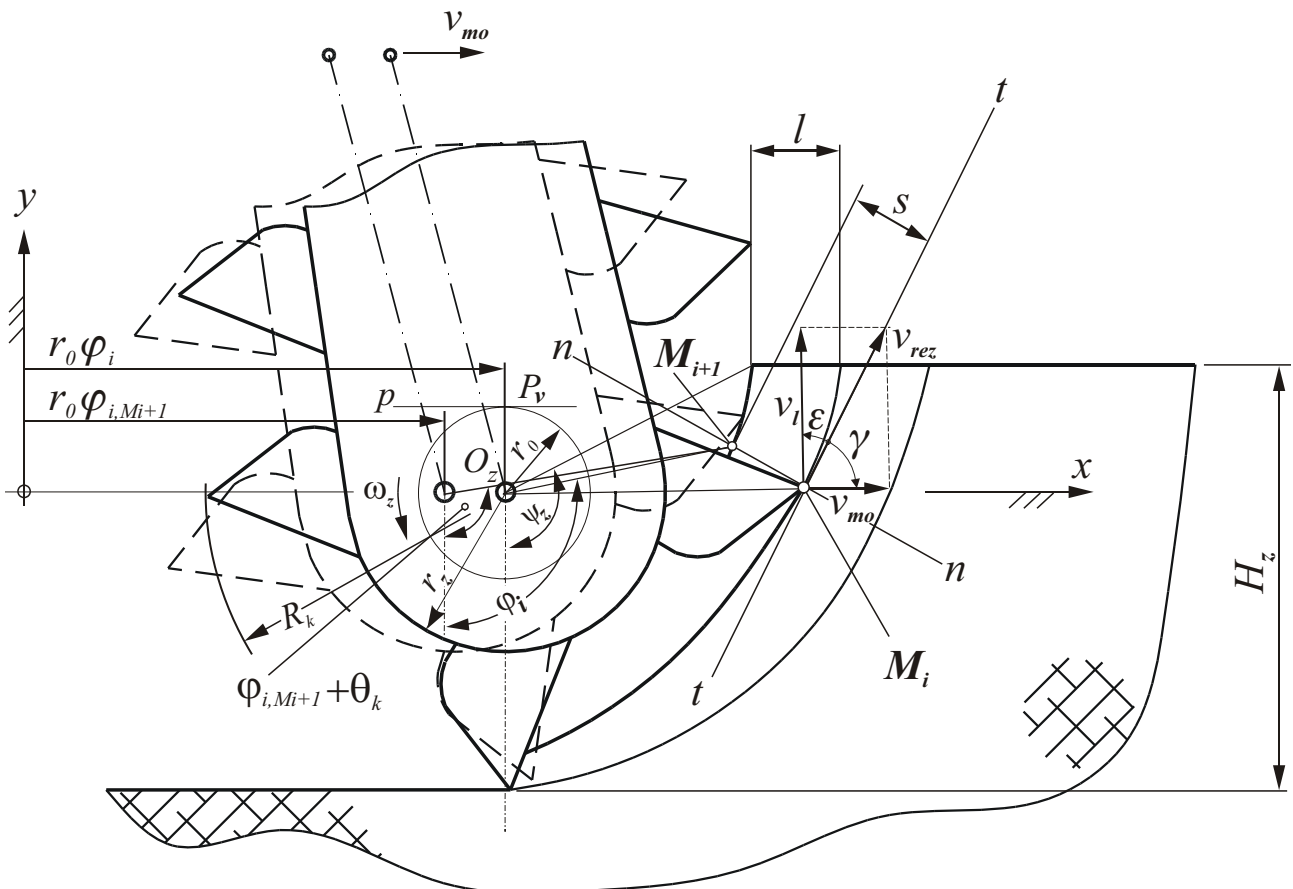
Da bi se eliminisali uzroci otkaza noseće konstrukcije pretovarnog mosta, izvršena je odgovarajuća rekonstrukcija, [20,21].

Ukrucenje rešetke kosnika krute noge izvedeno je ugradnjom dijagonala u postojeću rešetku kosnika i ugradnjom rešetke koja vezuje (i istovremeno ukrućuje) rešetku kosnika sa gredama glavog nosača i krutim portalom, slike 30 i 31.

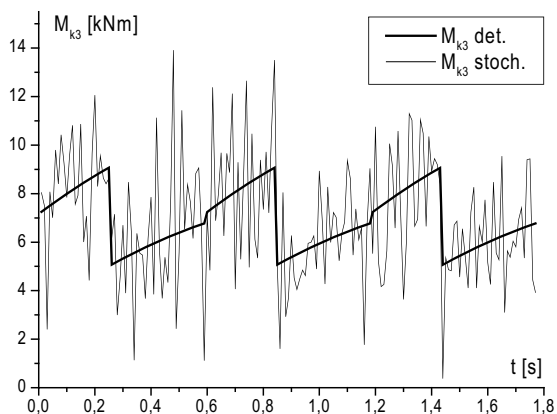
Poprečni preseki portala zatvoreni su tankim limovima, čime je višestruko povećana njihova uvojna krutost, uz istovremeno povećanje savojne krutosti, slika 32.



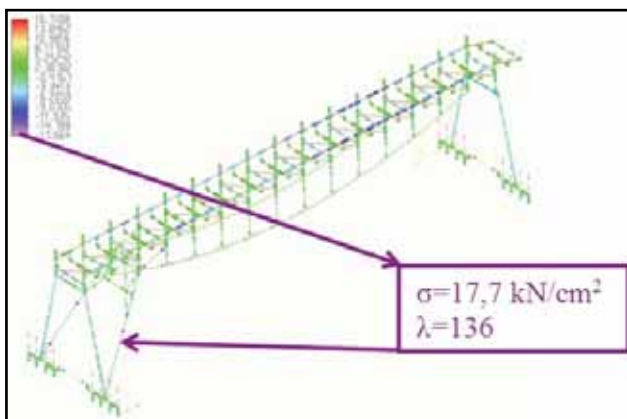
Slika 25. Pretovarni most za uglj Metalna 300 – detalji krute noge i zahvatnog uređaja



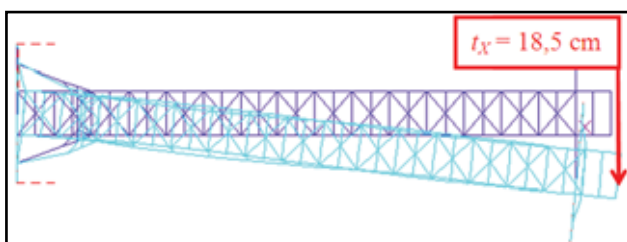
Slika 26. Kinematički model zahvatnog uređaja pretovarnog mosta [19]



Slika 27. Moment otpora zahvatanja materijala [19]



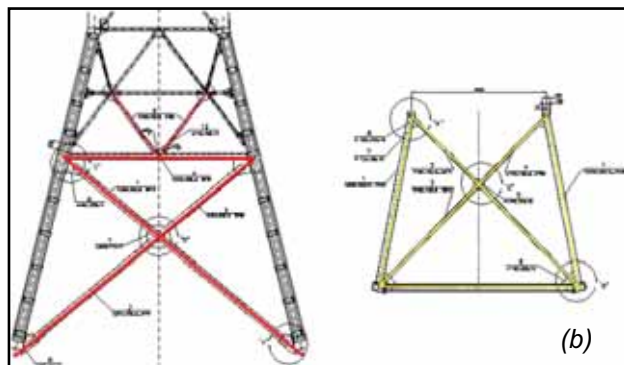
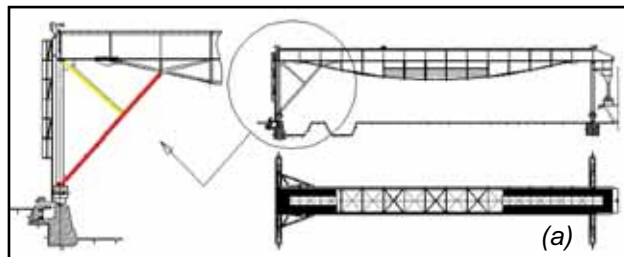
Slika 28. Distribucija napona pri zakošavanju originalne strukture



Slika 29. Pomeranja pri zakošavanju originalne strukture – horizontalna ravan

Povezivanjem donjih pojaseva vertikalnih rešetki glavnih nosača, slika 33 (plavi elementi) i ugradnjom dijagonala (crveni elementi), ostvareno je povećanje krutosti celokupne strukture u horizontalnoj ravni.

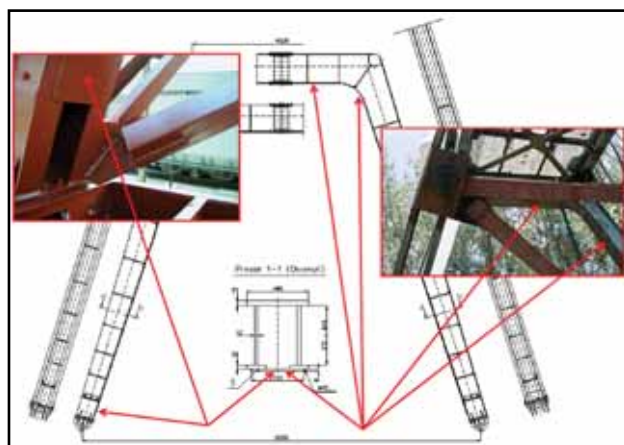
Rekonstrukcijom strukture ostvaren je znatno niži nivo naponskog stanja, uz istovremenu dislokaciju zone maksimalnih napona, slika 34. Maksimalni naponi javljaju u elementima vertikalne rešetke (napon zatezanja 11,3 kN/cm²) i glavnom nosaču (napon pritiska 12,8 kN/cm²). Naponi u kosnicima krute noge su znatno niži



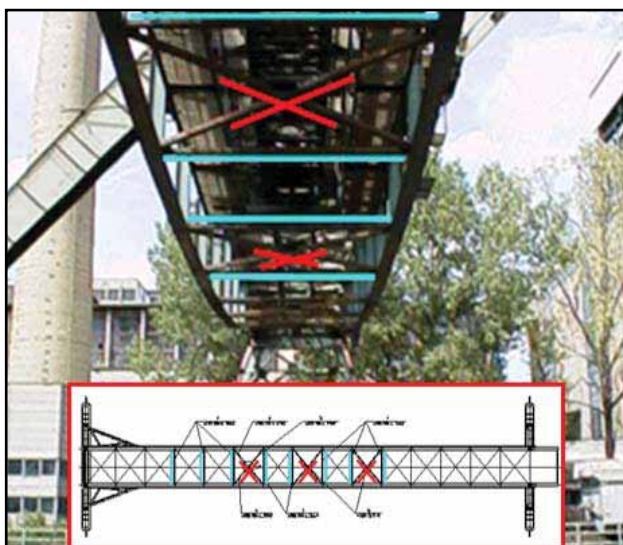
Slika 30. Ukrucenje rešetke kosnika (crveno) i vezna rešetka (žuto) – (a) dispozicija, (b) detalji



Slika 31. Izgled strukture u zoni krute noge nakon rekonstrukcije



Slika 32. Formiranje kutijastih preseka portala

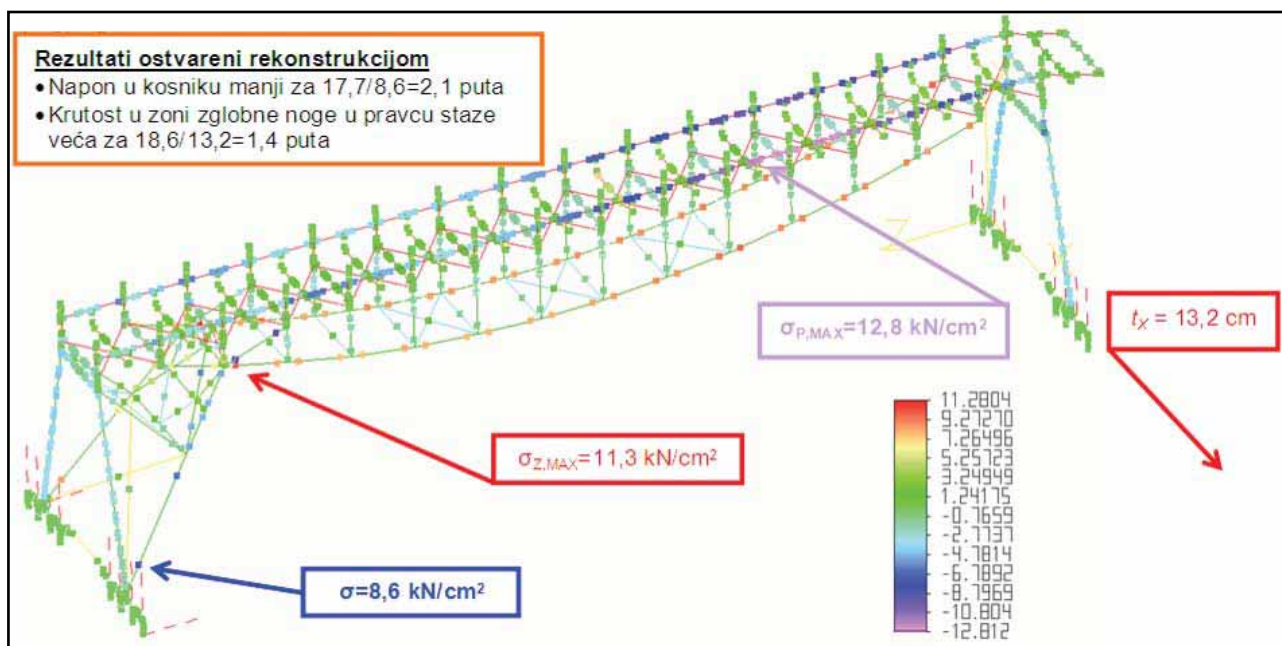


Slika 33. Ukućenja vertikalnih rešetki glavnih nosača

ZAKLJUČAK

Razvoj proračunskih modela i odgovarajućeg softvera omogućava da se sa dovoljnom tačnošću, sa inženjerskog aspekta, utvrde sve relevantne karakteristike spoljašnjeg opterećenja izazvanog otporom kopanja ili zahvatanja materijala. Osim toga, razvijeni modeli, koji su u radu vrlo sažeto prikazani, omogućavaju da se u pobudu uvede i odziv sistema. Time se pruža mogućnost i za ocenu stepena reolinearnosti analiziranih mehaničkih sistema.

Istraživanja dinamičkog ponašanja nosećih konstrukcija rotornih bagera na osnovu odziva odgovarajućih modela omogućavaju da se, relativno brzo, utvrdi stepen učešća pojedinih podstruktura i podsistema bagera. Na modelu koji



Slika 34. Distribucija napona pri zakošavanju redizajnirane strukture

u odnosu na projektovano stanje - maksimalni napon pritiska iznosi 8,6 kN/cm².

Povećanje krutosti rešetke krutog portala, uz istovremeno povećanje torziona krutosti njegovih nogu, rezultira manjim pomeranjima rekonstruisane strukture u horizontalnoj ravni - pomeranje referentnog čvora 66 u pravcu ose X globalnog koordinatnog sistema (pravac kranske staze) iznosi 13,2 cm.

Eksploataciono iskustvo nakon izvršenih rekonstrukcija sva četiri pretovarna mosta u potpunosti je potvrdilo valjanost primenjenih rešenja i samog postupka proračuna.

je prezentiran u radu, moguće je oceniti osetljivost pojedinih dinamičkih parametara sistema na promene karakteristika podsistema. Iako istraživanjima na matematičkom modelu nije moguće obuhvatiti sve pojave koje se dešavaju tokom eksploatacije, njihovi rezultati predstavljaju osnovu za predikciju mogućih neželjenih stanja mašine. Jasno, ona su nezamenljiva kada je reč o istraživanjima koja je neophodno sprovesti još u fazi projektovanja mašine.

Suptilna analiza opterećenja i razvoj konačno elementnih modela koji u potpunosti obuhvataju geometriju strukture, predstavljaju osnovu uspešnog redizajna nosećih konstrukcija

rotornih bagera i pretovarnih mostova. Valjanost prezentiranih konstrukcionih rešenja i prilaza problemu redizajna potvrđena je merenjima u realnim eksploatacionim uslovima i činjenicom da nakon izvršene rekonstrukcije nije dolazilo do otkaza redizajniranih podsistema mašina.

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja na projektu TR 14052 finansiranom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj.

LITERATURA

- 1) Bošnjak, S., Petković, Z., Zrnić, N., Simić, G., Simonović, A.: Cracks, repair and reconstruction of bucket wheel excavator slewing platform, *Engineering Failure Analysis*, Volume 16, Number 5, pp. 1631-1642, 2009.
- 2) Bošnjak, S., Zrnić, N., Simonović, A., Momčilović, D.: Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support, *Engineering Failure Analysis*, Volume 16, Number 3, pp. 740-750, 2009.
- 3) Bošnjak, S., Zrnić, N., Petković, Z.: Numerical – experimental analysis of structural strength of bucket wheel excavator revolving platform, *Proceedings of Second International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading*, pp. 1185-1193, German Association for Materials Research and Testing (DVM), Darmstadt, 2009.
- 4) Rusiński, E., Czmochoowski, J., Iluk, A., Kowalczyk, M.: An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture, *Engineering Failure Analysis*, article in press, doi: 10.1016/j.engfailanal. 2009.06.001.
- 5) Bošnjak, S., Petković, Z., Zrnić, N., Pantelić, M., Obradović, A.: Failure analysis and redesign of the bucket wheel excavator two-wheel bogie, *Engineering Failure Analysis*, article in press, doi: 10.1016/j.engfailanal. 2009.09.007
- 6) Bošnjak, S., Simonović, A., Petković, Z., Zrnić, N.: Uperedna analiza čvrstoće varijantnih konstrukcionih rešenja donje gradnje rotornog bagera C-700S, *Istraživanja i projektovanja za privredu*, Volume 4, Number 14, pp. 19-28., 2006.
- 7) Домбровский, Н. Г.: Многоковшовые экскаваторы, конструкции, теория и расчет, *Машиностроение*, Москва, 1972.
- 8) Makar, M.: Teorija bagerovanja rotornim bagerima, *Rudarski institut*, Beograd, 1990.
- 9) Pajer, G., Pfeifer, M., Kurth, F.: *Tagebau grosgerate und Universalbagger*, Veb Verlag Technik, Berlin, 1971.
- 10) Rasper, L.: *Der Sshaufelradbagger als Gewinnungsgerat*, Trans Tech Publications, Clausthal, 1973.
- 11) Ветров, Ю. А.: Резание грунтов землеройными машинами, *Машиностроение*, Москва, 1971.
- 12) Владимиров, В. М., Шендеров А. Н., Калашников, Ю. Т., Хазанет, Л. Л., Слизкий, П. И., Середа, Г. Л.: *Карьерные роторные экскаваторы*, Техника, Киев, 1968.
- 13) Bošnjak, S.: *Dinamika rotornih bagera sa radijalnim iskopom u uslovima stohastičke pobude izazvane otporom kopanju*, doktorska disertacija, *Mašinski fakultet*, Beograd, 1995.
- 14) Волков, Д. П., Черкасов, В. А.: *Динамика и прочност многоковшовых экскаваторов и отвалообразователей*, *Машиностроение*, Москва, 1969.
- 15) Petković, Z.: *Prilog analizi dinamičkog ponašanja roto bagera*, doktorska disertacija, *Mašinski fakultet*, Beograd, 1990.
- 16) Bošnjak, S., Petković, Z., Zrnić, N., Petrić, S.: *Mathematical modeling of dynamic processes of bucket wheel excavators*, *Proceedings 5th MATHMOD*, pp. 4.1–4.10, ARGESIM Verlag, Vienna, 2006.
- 17) Bošnjak, S., Zrnić, N., Petković, Z.: *Bucket wheel excavators and trenchers – Computer added calculation of loads caused by resistance to excavation*, *Machine Design*, monograph edited by S. Kuzmanović, pp. 121-128, University of Novi Sad, 2008.
- 18) Bošnjak, S., Petković, Z., Matejić, P., Zrnić, N., Petrić, S., Simonović, A.: *Analysis of stress – strain state of bucket wheel excavator revolving platform structure – fundament of efficient reconstruction*, *Structural Integrity and Life*, Volume 5, Number 3, pp. 129 – 142, Belgrade, 2005.

- 19) Bošnjak, S., Gašić, V., Petković, Z.: Determination of resistances to coal reclaiming at bridge - type stacker – reclaimer with bucket chain booms, FME Transactions, Volume 33, Number 2, pp. 79 – 88, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2005.
- 20) Bošnjak, S., Petković, Z., Gašić, V., Zrnić, N.: Pretovarni mostovi sa elevatorima – Deo I: Identifikacija opterećenja, proračun strukture i zakošavanje, Tehnika – Mašinstvo (55), Vol. LXI, broj 6, pp. 1–6, Beograd, 2006.
- 21) Bošnjak, S., Petković, Z., Gašić, V., Zrnić, N.: Pretovarni mostovi sa elevatorima – Deo II: Konstrukciono rešenje, tehnologija i proračun rekonstruisane strukture, Tehnika – Mašinstvo (56), Vol. LXI, broj 1, str. 7–13, Beograd, 2007.

SOME OF THE PROBLEMS ON DYNAMICS AND STRENGTH OF THE HIGH PERFORMANCE MACHINES

Constant exploitation of heavy duty machines, such as the bucket wheel excavator and bridge-type stacker-reclaimer, under the action of highly pronounced dynamic loads, may lead to the failures of their substructures and subassemblies. Unfortunately, high position among the causes of mentioned failures belongs to the designers omissions – mistakes done on the occasion of load analysis, modelling and response analysis. This paper presents an original procedure of calculating external loads caused by force resisting excavation. Model comprises all relevant structural parameters and parameters of duty cycles. Measurements in the real operating conditions have been done in order to establish the credibility of simulation model. Besides that, this paper discusses procedures for dynamic modelling of bucket wheel excavator superstructure. Developed model enables response analysis, with quite satisfactory accuracy, from the engineering point of view. Redesign of the bucket wheel excavator slewing platform, as well as redesign of the bridge-type stacker-reclaimer structure, is presented. The efficiency of these reconstructions is unquestionably confirmed by failureless service of mentioned machines.

Key words: bucket wheel excavator, bridge - type stacker-reclaimer, force resisting excavation, dynamics, strength

Rad poslat na recenziju: 30.09.2009.

Rad spreman za objavu: 23.12.2009.