

**Дијагностика понашања погонских група
на роторном багеру****Стручни рад
Professional paper*****Behaviour Diagnostics of Drive Units on Bucket Wheel Excavators*****Predrag JOVANČIĆ, Dragan IGNJATOVIĆ, Taško MANESKI**

Дијагностика понашања погонских група на роторном багеру је сублимација аналитичког пресека стања, нумеричког модела преко методе коначних елемената и измерених вибрација на карактеристичним местима погонских група, односно, даје се методолошки приступ утврђивања понашања погонских група на роторном багеру у циљу њихове даље ревитализације. Приступ решавању проблема је концепцијски строго дефинисан – аналитички сегмент којим се улази у проблем, моделирање проблема као смерница за доношење инжењерског става, и експериментални део који треба да потврди исправност и тачност методологије у функцији откривања узрока аномалије и њеног превентивног отклањања или доношења исправне одлуке.

Behaviour diagnostics of drive units on the bucket wheel excavator represents sublimation of analytical state estimation, numerical model based on finite elements method and measured values of the vibrations at the drive units typical locations. Namely, methodological approach in the behaviour determination process for bucket wheel excavators drive units is presented, for the purpose of its further revitalization. Problem resolving approach is conceptually strictly defined – analytical segment for initial insight of the problem, problem modeling as the line for establishing the engineering position and finally experimental part designated for confirming the accuracy and precision of the methodology with the purpose of locating the causes of anomaly and preventive remediation, or making the right decision.

1. Увод

Погонске групе на роторном багеру су основни елементи преноса обртног момента и преко њих се омогућују сва трансаторна и обртна кретања која су у крајњој функцији остваривања производње. Главне погонске групе на роторном багеру су: погон радног точка, погон гусеничног транспорта, погон окрета багера, погон дизања и спуштања стреле радног точка и погон трачних транспортера на багеру. Ипак, најважнији погон и уједно погон који у ствари и карактерише роторни багер је погон радног точка. Зато је у овом раду њему и дат највећи значај, и његово динамичко понашање и приступ ревитализационим процесима могу се представити као репер осталим погонима на багеру.

2. Методологија дијагностике понашања погонских група на роторном багеру

Поштујући строго субјективно утврђен принцип израде овог рада, који је сублимација аналитичког пресека стања, нумеричког модела преко методе коначних елемената и измерених *in situ* вибрација на карактеристичним местима погонских група, дефинисан је методолошки приступ утврђивања понашања погонских група на роторном багеру. То је засигурно нов прилаз који даје квалитет

1. Introduction

Drive units on bucket wheel excavator are main elements of torque transfer. They enable every translator and rotary motions for the purpose of production. Main drive units on the bucket wheel excavator are: bucket wheel's drive, transport drive, superstructure swing drive, drive for lifting/lowering of beam and belt conveyors drives. However, most important drive and the drive that characterises the bucket wheel excavator is the bucket wheel's drive. For this reason, it is emphasised in this paper and its dynamic behaviour and revitalization processes approach can be presented as an model or example for all other drives.

2. Methodology of Bucket Wheel Excavator Drive Units Behaviour Diagnostic

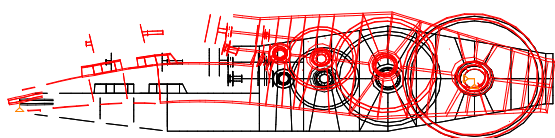
Following the strictly subjectively defined principles of this paper, which are representing sublimation of analytical condition estimation, numerical model based on finite elements method and measured values of the vibrations at the drive unit's characteristic locations, the methodological approach to identifying (establishing) the behaviour of drive units on the bucket wheel excavator was defined. That

више при крајњем ставу, при коначној одлуци, како код одржавања по стању тако и код евентуалних ревитализационих процеса на рударским машинама, односно на роторним багерима.

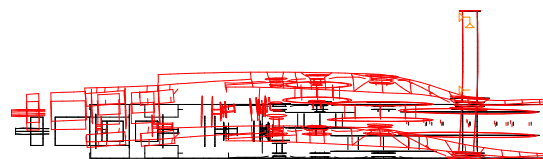
Овакав приступ омогућава одређивање стварног понашања погона, поуздану прогнозу реаговања истог у експлоатацији, добијање параметара избора и одлука, одређивање узрока лошег понашања или попуштања, процену експлоатационог века и време поузданог рада погонске групе. Овом методологијом утврђује се стање погонских група, при чему се утиче на лоше понашање, односно на узрок тог понашања, а не на последицу. На основу утврђеног понашања утврђује се преостала чврстоћа и његов радни век, односно да ли тај елемент има и даље пројектовану, тражену радну способност.

3. Компјутерски модели и динамички прорачун

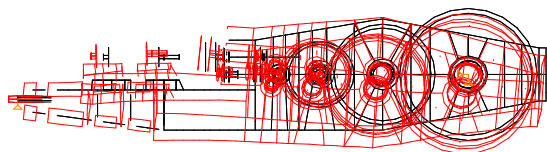
Моделирање и динамички прорачун је извршен за погоне радног точка багера SRs470.17/1.5, SRs1300.26/5 (нова верзија погона радног точка). Модели су урађени линијским, површинским и запреминским коначним елементима, односно програмским пакетом KOMIPS. Модел и динамички прорачун погона радног точка багера SRs470.17/1.5, са прва четири главна облика осциловања, дати су на слици 1.



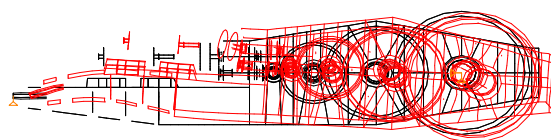
Први главни облик осциловања – $f_{01} = 15.3 \text{ Hz}$
First main form of vibration – $f_{01} = 15.3 \text{ Hz}$



Други главни облик осциловања – $f_{02} = 18.7 \text{ Hz}$
Second main form of vibration – $f_{02} = 18.7 \text{ Hz}$



Third main form of vibration – $f_{03} = 28.6 \text{ Hz}$



Fourth main form of vibration – $f_{04} = 34 \text{ Hz}$

Сл. 1. Модел и прва четири главна облика осциловања структуре редуктора радног точка – SRs470.17/1.5
Fig. 1. Model and first four main forms of vibration of gear-box loading structure – SRs470.17/1.5

На основу приказаног динамичког прорачуна може се констатовати веома неповољно динамичко понашање носеће конструкције како редуктора тако и целе носеће структуре погонске групе радног точка багера SRs470.17/1.5 (моментна полука и носач електромотора).

Модел и динамички прорачун нове варијанте погона радног точка багера SRs1300.26/5, са израженим облицима осциловања, дати су на слици 2.

certainly represents a new approach, adding quality to the final decision, regarding the maintenance as well as possible revitalization processes of the mining machines, namely bucket wheel excavators.

This approach enables determination of the real behaviour of unit, reliable prognosis of its reaction during exploitation, obtaining the choice and decision parameters, determination of the improper behaviour or failing causes, estimation of the exploitation duration and drive unit reliable operation time determination. This methodology is used for identifying the drive unit's condition, thus influencing on improper behaviour, namely cause of that behaviour, not its consequence. According to identified behaviour, remaining strength and its operating lifetime is determined, or more precisely - weather that element still has its designed, required operating capability.

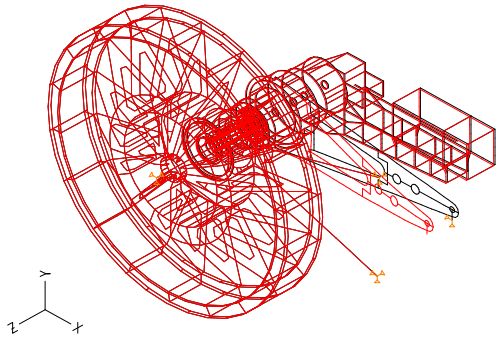
3. Computer Models and Dynamic Calculation

Modelling and dynamic calculations are performed for bucket wheel drive units on the excavators SRs470.17/1.5, SRs1300.26/5 (new version of the bucket wheel's drive). Models are based on linear, aerial and volumetric finite elements, using KOMIPS software package.

Model and the dynamical calculation for the bucket wheel's drive on the SRs470.17/1.5 excavator along with first four main forms of vibration, are presented in Fig. 1.

Above presented dynamic calculation shows very unfavourable dynamical behaviour of the gear-reduction loading structure and whole loading structure of the bucket wheel's drive unit on the SRs470.17/1.5 excavator (torque lever and electric motor support).

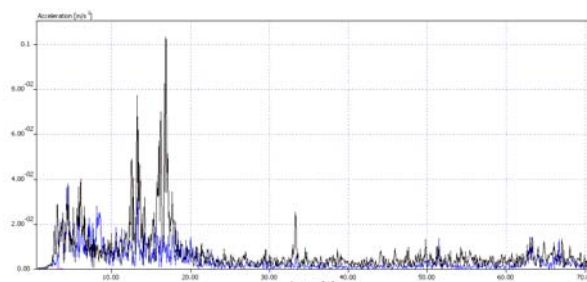
Model and dynamical calculations for the new bucket wheel's drive on the SRs1300.26/5 excavator, along with expressed forms of vibration, are presented in Fig. 2.



јених сигнала на улазном вратилу за стару и нову варијанту са очигледном разликом у добијеним вредностима у корист нове варијанте. Овакав приступ је уједно и потврда динамичког модела и прорачуна.



signals at the input shaft for old and new variant, with the obvious difference in the values benefiting the new variant. Old input shaft has greater acceleration in the time domain than the new one— 0.6 m/s^2 as opposed to 0.4 m/s^2 . This approach represents confirmation of the dynamic model and calculations.

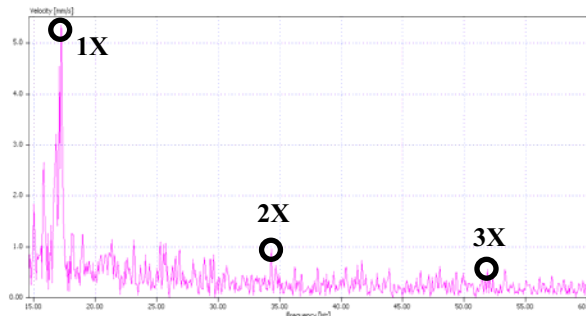


Сл. 4. Упоредни приказ сигнала убрзања у фреквентном домену улазног вратила редуктора радног точка багера SRs2000.28/3, за нову и стару варијанту

Fig. 4. Acceleration signal comparison of the bucket wheel's reduction input shaft on the SRs2000.28/3, in the frequency domain, new and old variant

Први степен оштећења лежаја проузрокује знак који одаје несинхронизоване фреквенције вибрација назване „тонови (шумови) лежаја“ или сигнали, и њихове хармоније. Понекад нови лежајеви производе шумове, нарочито ако су оштећени током монтаже, пребацивања, или приликом производње. На слици 5 дати су хармоније сигнала брзине у фреквентном домену лежаја 22332 на вратилу III редуктора погона радног точка багера SRs470.17/1.5, где је и настала касније хаварија тог истог лежаја. Сигнал је најјачи на 17.3 Hz (5.3 mm/s), други хармоник 34.6 Hz (1 mm/s) и трећи хармоник 52 Hz (0.6 mm/s). Сигнал је изражен у вертикалном (аксијалном) правцу.

First degree of the bearing's defect induces signal that reveals unsynchronized vibration frequencies called “tones (noise) of the bearing” or signals, and their harmonics. Sometimes new bearings produce noises, especially if they have been damaged in the process of assembling, relocation or production. Fig. 5 presents velocity signal harmonics in the frequency domain of the 22332 bearing on the shaft III of the wheel's gear-reduction drive on the SRs470.17/1.5 excavator, which later failed. Signal is most pronounced at the frequency of 17.3 Hz (5.3 mm/s), second harmonic 34.6 Hz (1 mm/s) and third harmonic 52 Hz (0.6 mm/s). Signal is pronounced in vertical (axial) direction.



Сл. 5. Хармоније тонова лежаја 22332 на вратилу III редуктора радног точка багера SRs470.17/1.5

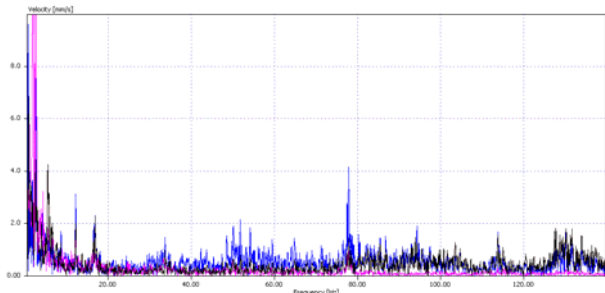
Fig. 5. Tone harmonics of the 22332 bearing on the shaft III of the bucket wheel's gear-reduction drive on the SRs470.17/1.5 excavator

Кључ за ефективно предиктивно одржавање лежаја је тренд нивоа тонова лежаја током времена од њиховог почетка. Понекад оштећење лежаја напредује од веома малог дефекта до комплетног отказа у релативно кратком времену, тако да рана детекција захтева осетљивост на веома мале компоненте вибрација.

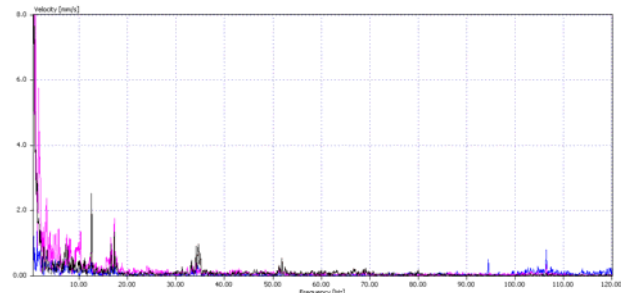
Погонска група радног точка багера SRs470.17/1.5, у првом реду редуктор, има лоше динамичко понашање, што је манифестовано преко прве четири сопствене фреквенције и њихових облика осциловања. На слици 6 дати су дијаграми добијених сигнала брзине у фреквентном домену на месту улазног вратила редуктора радног точка багера SRs470.17/1.5, за сва три радна случаја.

Key for the effective predictive maintenance of the bearing is the trend of its tone level since beginning of operation. Sometimes damage of the bearing progresses from small defect to complete failure, in relatively short period. Therefore, early detection requires sensibility to very small vibration components.

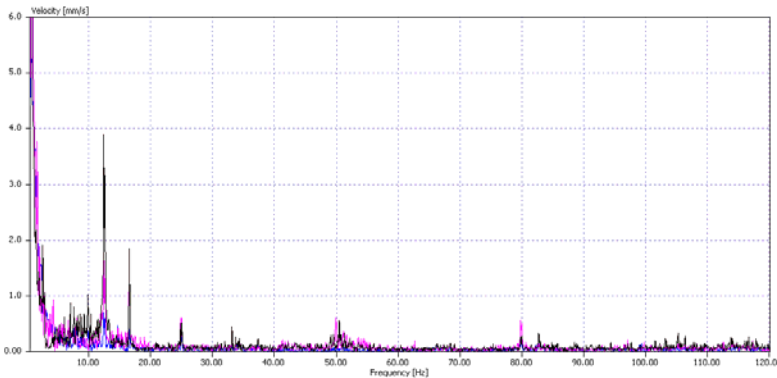
Bucket wheel's drive unit on the SRs470.17/1.5 excavator, primarily gear-reduction, has poor dynamic behaviour manifested through first four own frequencies and their vibration forms. Fig. 6 shows diagrams of the speed signals in the frequency domain at the bucket wheel's gear-reduction input shaft on the SRs470.17/1.5 excavator, for all three cases.



*Редуктор, вратило I – пре ремонта, у раду
Gear-reduction, shaft I – before repair (at operation)*



*Редуктор, вратило I – после ремонта, на пробном столу
Gear-reduction, shaft I – after overhaul, on the test-table*



*Редуктор,
вратило I – после ремонта, у раду
Gear-reduction,
shaft I – after overhaul (at operation)*

*Сл. 6. Сигнали убрзања у фреквентном домену вратила I редуктора радног точка багера SRs470.17/1.5
Fig. 6. Acceleration signals in the frequency domain at the bucket wheel's gear-reduction shaft I on the SRs470.17/1.5 excavator*

На основу поређења мерења вибрација при раду редуктора на багеру и радном столу, закључујемо да је највише дошло до повећања вибрација само на фреквенци 12.4 Hz и то са брзином 4 mm/s. Ово је разумљиво јер је редуктор више и неповољније оптерећен у раду на багеру него ли на пробном столу, у фабрици.

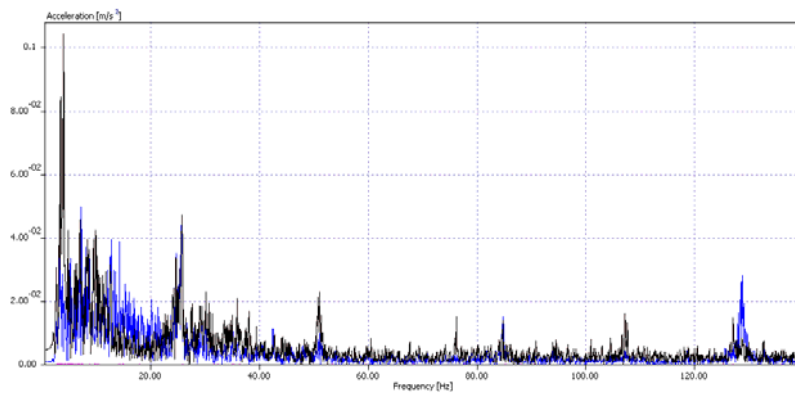
На багеру SRs1300.26/5 на ПК „Дрмно“ радила су и раде два различита типа и концепције редуктора погона радног точка. Код старе варијанте погонске групе основни недостаци редуктора су веома дугачка момента полуца, недовољно крут склоп улазног вратила редуктора, вратила ротора електромотора и самог електромотора и велике тежине која неповољно утиче на расподелу оптерећења затега и стуба багера (момент увијања стреле велики у односу на подужну осу). Овај недостатак се може минимизирати тако што се код наведених места морају елиминисати зазори, али и да везе буду коректне и задовољавајуће. Елиминисање наведеног недостатка захтева повећање крутости наведених елемената система за копање.

Код нове варијанте погонске групе радног точка багера SRs1300.26/5, на основу динамичког прорачуна система радног точка, може се закључити следеће: нема корелација са фреквенцама копања (код старе варијанте то је изражено), нема прелома вратила електромотора и улазног вратила редуктора (такође је изражено код старе варијанте), у опсегу рада електромотора постоји непожељно осциловање моментне полуге и носача електромотора. На слици 7 дати су упоредни дијаграми мерења вибрација у фреквентном домену, на старом редуктору (узет је пример са редуктора копања на багеру SRs1300 који ради на ПК „Поље Д“) и новом редуктору који је уграђен на багеру SRs1300 који тренутно ради на ПК „Дрмно“.

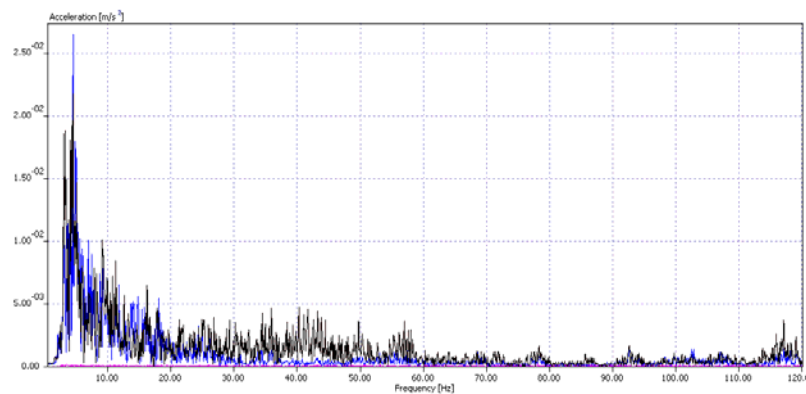
Based on the comparison of the vibration measured during the gear-reduction operation at the excavator and on the testing table, following conclusion was reached: greatest increase in the vibrations is at the frequency of 12.4 Hz at speed of 4 mm/s. This is understandable because the gear-reduction is loaded more during its operation at the excavator, than on the testing table at the factory.

Two different types and concepts of the gear-reduction bucket wheel's drive have been operating, and still are, at the SRs1300.26/5 at Drmno open pit. Main disadvantages of the old gear-reduction drive unit implies: very long torque lever, insufficiently stiff assembly consisting of the gear-reductions input shaft, rotor's shaft, the electric motor itself and great weight unfavourably influencing distribution of the load on tie-weight and the pillar of the excavator (beam torsion torque is large in comparison to longitudinal axis). This disadvantage can be minimised if the gaps are eliminated at the mentioned locations, whilst keeping connections correct and satisfactory. Elimination of this disadvantage implies stiffness increase of the mentioned elements of the system.

New variant of the bucket wheel drive unit on the SRs1300.26/5 excavator, based on the bucket wheel's system dynamic calculation, following conclusion can be reached: there are no correlations with the digging frequencies (present at old variant), there are no failures of the shafts (also present at old variant), there are unfavourable vibrations of the torque lever and the electric motor support within operating scope of the electric motor. Fig. 7 shows comparison of the vibration measured within frequency domain, at the old gear-reduction (SRs1300 operating at Field D open pit) and new one mounted on the SRs1300 currently working at Drmno open pit.



Стара варијанта / Old variant



Нова варијанта /New variant

Сл. 7. Упоредни дијаграми убрзања вибрација измерених на улазном вратилу редуктора радног точка багера SRs1300 – стара и нова варијанта погонске групе
 Fig. 7. Comparisons of vibration accelerations, measured at the input shaft of the bucket wheel's gear-reduction on the SRs1300 – old and new variant

Већа крутост новог редуктора је доказана како динамичким прорачуном (неповољно осциловање изражено код моментне полуге и носача мотора), тако и експерименталним мерењем. На карактеристичном, доминантном месту улазног вратила редуктора, максималне амплитуде у временском домену су 0.15 m/s^2 , а у фреквентном домену 0.025 m/s^2 . Код старог редуктора те вредности су неколико пута веће и то са израженим сигнаlima који указују на будуће проблеме. Максимална амплитуда у временском домену је овде 0.55 mm/s , а у фреквентном домену 0.1 mm/s . Очито је да стара варијанта мора претрпети промене у геометрији и новом дизајну са аспекта повећања нивоа крутости, односно повећања сопствених фреквенци. То је, између осталог, и довело до замене старе погонске групе радног точка багера SRs1300 на ПК „Дрмно“. Код нове погонске групе, знајући да је електромотор са фреквентном регулацијом, измерена брзина обртања, односно побудна брзина, је на 1020 min^{-1} . Нема изражених хармоника побуде (2X, 3X итд.), па се може констатовати висока крутост елемента са добро распоређеном масом, што није био случај са старом погонском групом.

4. Закључак

Ревитализација роторног багера је инжењерски креативан и сложен поступак који обухвата скуп електромашинских интервенција којима се врши замена свих до трајалих или оштећених делова и, евентуално, њихова модернизација. Оно што претходи поступцима који чине ревитализацију су обимна и прецизна дијагностичка

Increased stiffness of the new gear-reduction is confirmed by dynamic calculation (unfavourable vibrations at torque lever and motor support) as well as experimental measuring. Value of the amplitudes in time domain, taken at typical, dominant place of the gear-reduction input shaft, is 0.15 m/s^2 , whereas in frequency domain this is 0.025 m/s^2 . These values are several times greater for old gear-reduction, with pronounced signals indicating future problems. Maximal amplitude in the time domain in this case is 0.55 mm/s , and 0.1 mm/s in the frequency domain. Obviously, old variant must be revised regarding geometry and the new design from the aspect of increasing the stiffness level, namely increasing the own frequencies. Among other things, this caused the replacement of the old bucket wheel's drive unit on the SRs1300 excavator at the Drmno open pit. Considering the fact that electric motor has frequency regulation, measured rotation speed i.e. speed of actuation at the new drive unit is 1020 min^{-1} . There are no pronounced actuation harmonics (2X, 3X etc.), therefore the high stiffness of the elements with proper distribution of the load can be stated, which was not the case for the old drive unit.

4. Conclusion

Revitalization of the bucket wheel excavator is creative and complex engineering process. It involves set of electrical and mechanical interventions performed to replace all deteriorated and damaged parts and possibly modernize them. Revitalization procedures are preceded by comprehensive and precise diagnostic examinations. More

испитивања. Код електро и машинске опреме на багеру, успостављени су јасни критеријуми о њиховој замени или рехабилитацији него код челичне конструкције, без обзира што за радни век роторног багера, важи правило да директно зависи од трајности челичне конструкције. Сложеност структуре роторног багера утиче и на сложеност процеса ревитализације, знајући да се на роторном багеру налазе различите групе градње машинске и електро опреме, које представљају циљну групу ревитализације.

Основни резултати који дефинишу глобални ниво понашања погонске групе, а који су добијени аналитичко-нумеричко-експерименталним прорачуном и мерењем (могу се третирати и као правци деловања ка одржању), указују на следеће:

- погонске групе радног точка које имају велико растојање између ослонаца, имају релативно лоше динамичко понашање; у динамичком прорачуну појава прелома улазног вратила као први, 2X, 3X или 4X хармоник, доказано вибрирањем; старије изведбе имају мањи глобални ниво крутости; често се побуда од обртања вратила ротора електромотора или улазног вратила редуктора поклапа са фреквенцом понашања конструкције на прелазу нивоа крутости; код новијих изведби, проблеми су локалног карактера и то најчешће изражени преко неадекватног улазног вратила и моментне полуге малог нивоа крутости;
- улазно вратило редуктора или вратило ротора електромотора, као главни показатељ динамичког понашања редуктора и електромотора, морају имати довољни ниво крутости и морају бити оптимизирана са аспекта димензионалности и геометрије (конзолни део према спојници мора бити мањи или једнак растојању између лежачева у редуктору); постављања тежег дела спојнице на страни вратила ротора електромотора, због већег нивоа крутости и више прве фреквенце је оправдано.

Погонска група радног точка роторног багера, између осталих, имајући у виду динамички модел, може имати временом лоше понашање, у зависности од напред наведених грешака у нивоима крутости, геометрији и ослоњцима. Међутим, правилним посматрањем целе групе, односно свих њених елемената, од шапа електромотора, преко елемената преноса обртног момента, до ослонаца погонске групе на стрели радног точка, као и инжењерском интуицијом, може се доћи до правилног дијагностиковања стања и понашања, и долажења до узрока проблема, у циљу његовог превазилажења.

exact criteria for replacement or rehabilitation were established for electrical and mechanical equipment at the excavator then for steel construction, regardless the fact that lifetime of the bucket wheel excavator is directly related on lifetime of the steel construction. Since the bucket wheel excavator comprises of different structural units, machinery parts and electric equipment representing the target group for the revitalization, it is safe to say that the bucket wheel's structure complexity influences complexity of the revitalization process.

Main results defining the global level of drive unit's behaviour, attained through analytical-numerical-experimental calculation and measuring (representing actions towards maintenance), indicate following:

- Bucket wheel's drive units with great distance between supports has poor dynamic behaviour; in dynamical calculation input shaft failure appearance as first, 2X, 3X or 4X harmonic, as proved by vibrodiagnostics; older constructions have lower global level of stiffness; often the actuation from the rotation of the rotor's shaft or the actuation from the gear-reduction input shaft coincide with the behaviour frequency of the construction at the transition of the stiffness levels; with newer constructions, problems are localized and often expressed through inadequate input shaft and torque lever with the small level of stiffness;
- Input shaft of the gear-reduction or shaft of the electric motor rotor, as main indicator for the dynamic behaviour of gear-reduction and electric motor, must have adequate level of stiffness. They also have to be optimized from the aspect of dimensioning and geometry (console part towards the coupling has to be less than or equal to the distance between the bearings of the gear-reduction); placing the heavier part of the coupling at the side of the electric motor rotor's shaft is justified by the higher level of stiffness and higher first frequency.

Based on the dynamical model, bucket wheel's drive unit on the excavator can perform poor behaviour in time, depending on above-mentioned mistakes concerning levels of stiffness, geometry and supporting. Nevertheless, adequate observation of the whole group, namely all of its elements such as electric motor pad, elements of power transfer, supports of the drive units at the beam, and engineering intuition can lead to proper condition and behaviour diagnostic, and detection of the cause of the problem with the goal of overcoming it.

Литература - References

- [1] MANESKI, T., *Kompjutersko modeliranje i proračun struktura*, Mašinski fakultet u Beogradu, 1998.
- [2] MANESKI, T., *Rešeni problemi čvrstoće konstrukcije*, Mašinski fakultet u Beogradu, 2002.
- [3] IGNJATOVIĆ, D., MANESKI, T., JOVANČIĆ, P., *Projekat i priprema tenderske dokumentacije za rekonstrukciju i modernizaciju opreme na III BTO sistemu u Ćirikovcu – Projekat sistema za kopanje bagera SRs1300.26/5x0+VR na PK "Ćirikovac"*, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 2003.
- [4] IGNJATOVIĆ, D., MANESKI, T., JOVANČIĆ, P., *Elaborat Dijagnostika ponašanja i stanja reduktora pogona radnog točka rotornog bagera SRs470.17/1.5 na P.K. "Drmno"*, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 2006.
- [5] JOVANČIĆ, P., IGNJATOVIĆ, D., MANESKI, T., *Prilog dijagnostici dinamičkog ponašanja pogona radnog točka rotornog bagera*, Proceedings of the VII International Symposium on Mechanization and Automatization from Mining and Energetics MAREN06, RGF, Belgrade 2006, ISBN 86-7352-175-0, pp 342-347
- [6] JOVANČIĆ, P., IGNJATOVIĆ, D., MANESKI, T., *Dijagnostika ponašanja pogonskih grupa na rudarskim mašinama*, Proceedings of the VII International Symposium on Mechanization and Automatization from Mining and Energetics MAREN06, RGF, Belgrade 2006, ISBN 86-7352-175-0, pp 325-335
- [7] JOVANČIĆ, P., IGNJATOVIĆ, D., MANESKI, T., *Diagnostics of behaviour of drive units on mining machines*, Proceedings of the International Conference on Mine planning and equipment selection MPES 2006 - vol. 1, Torino, Italy, ISBN 88-901342-4-0, pp 107-112

Адреса аутора - Contact address



Predrag JOVANČIĆ, M.Sc.Eng.
University of Belgrade, Faculty of Mining and geology, Mining mechanization research group
Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia
pjovancic@rgf.bg.ac.yu



Dragan IGNJATOVIĆ, Prof. Ph.D.Eng.
University of Belgrade, Faculty of Mining and geology, Mining mechanization research group
Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia
gagi@rgf.bg.ac.yu



Tasko MANESKI, Prof. Ph.D.Eng.
University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia
tmaneski@mas.bg.ac.yu