

**Анализа статичког и динамичког понашања
реконструисане носеће конструкције претоварног
моста за угаљ****Стручни рад
Professional paper*****Static/Dynamic Behaviour Analysis of Reconstructed Structure of
Special Coal Stacker-Reclaimer*****Srdan BOŠNJAK, Vlada GAŠIĆ, Nenad ZRNIĆ, Zoran PETKOVIĆ**

Да би се задовољили све већи експлоатациони захтеви, перформансе претоварних мостова за угаљ се константно побољшавају. Уколико промена перформанси није праћена свеобухватном анализом носеће структуре то у експлоатацији често може да резултира отказима конструкције и њених погонских система. У овом раду приказана је реконструкција моста базирана на детаљној анализи спољашњег оптерећења, са акцентом на одређивање оптерећења изазваног процесом захватања угља. Реконструисана носећа конструкција, уз минимално повећање масе од 2%, обезбеђује довољну чврстоћу и крутост структуре. Поређење са оригиналном конструкцијом и верификација добијених резултата извршена је статичком и динамичком анализом на коначноелементним моделима структуре. Дата су напонска стања конструкције, поље померања и фреквенције осциловања структуре. Коначна верификација реконструкције дата је петогодишњом експлоатацијом претоварних мостова без већих проблема и застоја у раду.

In order to satisfy higher exploitation demands, performances of stacker-reclaimers have constant amplification. Performance changes without correlation with structural analysis may result in often collapses and failure of reclaiming systems. This paper presents reconstruction of coal stacker-reclaimer based on detailed analysis of external loads with emphasis on loads caused by coal reclaiming process. Reconstructed structure, with minimum mass increasment of 2%, provides sufficient strength and stiffness of structure. Here is presented comparison of static and dynamic parameters with original structure. There are obtained stress field level, displacements and frequencies of structure. Final verification is given through 5 years exploitation without significant failures.

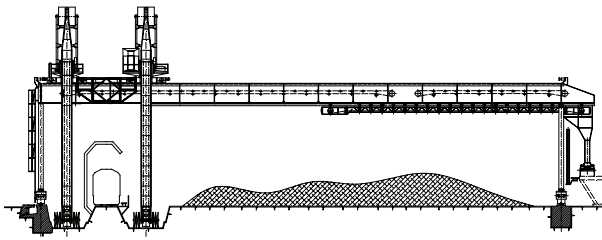
1. Увод

Машине за претовар расутих материјала су незаобилазна карика на складиштима (депонијама) у индустрији цемента, рударској индустрији, хемијској индустрији, металургији, као и електранама и лукама. Конструкције савремених претоварних мостова нису претрпеле велике промене од настанка ових машина [10]. Међутим, перформансе мостова (брзина траке, брзина колица, брзина обртања роторног уређаја) се константно побољшавању, упоредо са аутоматизацијом радних процеса. Претоварни мостови са роторним уређајем (ротор и елеватор) изразито погодни су за депоније са захтевом за сталним мешањем материјала. Примери овог типа машина се могу наћи у термоелектрани Колубара, (Велики Црљени, Србија), где раде на отвореној депонији угља у склопу система транспорта угља. Ови претоварни мостови су израђени од стране произвођача „Метална“ 1957. године и имали су капацитет захватања угља у пољу 1x140 t/h. Приказ оригиналне конструкције је дат на следећој слици. Главни делови конструкције су дати у [3].

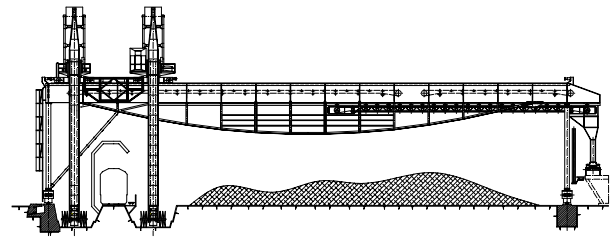
1. Introduction

Stacker-reclaimers are basic link on stockpiles of bulk in various industries: cement, mining, chemical, metallurgy, as well in plants and ports. Modern structures of these machines have no major structural changes since their beginning [10]. However, performances like velocities of working parts are higher, along with automation of working processes. Wheel reclaimers are especially suitable to serve stockpiles with blending effect. These machines can be found in power plant Kolubara, (Veliki Crljeni, Serbia), where they work within the open coal transportation system.

These 4 machines are produced in 1957 by manufacturer “Metalna” with reclaiming capacity 1x140 t/h in the field and 2x140t/h in the trenches. Main parts and technical descriptions are given in [3]. Display of original construction is given in figure 1.



Сл. 1. Првобитна конструкција, 1957. год.
Fig. 1. Initial structure, 1957., cap. 1x140 t/h



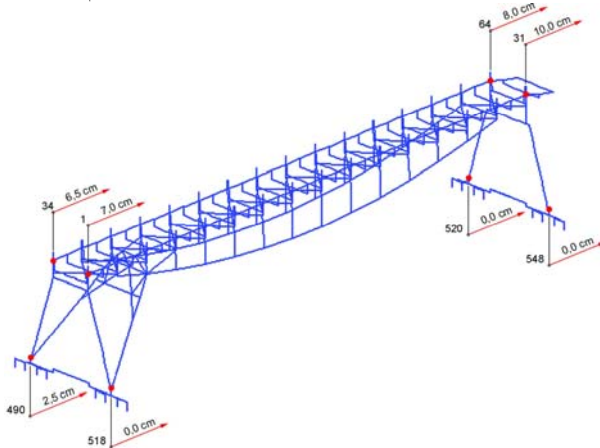
Сл. 2. Првобитна реконструкција, 1977. год.
Fig. 2. First reconstruction, 1977., cap. 2x150 t/h

Са циљем повећања капацитета, извршена је реконструкција претоварних мостова изведених 1977. год. Капацитет у пољу је повећан на 2x150 t/h, захваљујући чињеници да је мост ојачан тако да дозвољава рад оба захватна уређаја у пољу. Главни носачи су ојачани решетком у вертикалној равни и додатно је укрупњена крута нога, слика 2.

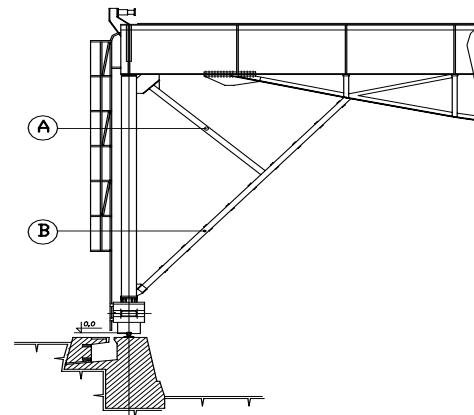
Након неколико отказа носеће структуре претоварног моста, вршене су реконструкције и санације, без дубље анализе узрока нежељених појава. Осим тога, трајне деформације структуре моста конзервиране су неадекватним конструкционим решењима санација. Релативна одступања референтних чворова носеће структуре претоварног моста у односу на пројектовано стање, утврђена геодетским снимањем 2002. год., приказана су на слици 3.

Due to demands for capacity increase, there has been done first reconstruction of stacker-reclaimers in 1977. Reclaiming capacity in the field reaches 2x150 t/h according to possibility that two reclaiming elevators can work in field. Two vertical trusses are added to main girders, along with stiffness increase of rigid leg-portal, fig. 2.

Few recoveries and small reconstructions are done after several collapses of stacker-reclaimer system, without profound analysis of machine behavior. Also, according to previous notes structure resulted in permanent deformations. Relative displacements of characteristic structure joints, compared with design shape of structure, are measured in 2002 and given in figure 3.



Сл. 3. Релативна одступања конструкције
Fig. 3. Relative structure deviation



Сл. 4. Положај решетке за укрупњавање круте ноге
А-везна решетка, Б-решетка косица
Fig. 4. Reconstruction within the rigid leg area;
A-bonding truss, B-bracing truss

Одзив коначноелементног модела деформисане носеће структуре претоварног моста на задата померања, слика 1, у карактеристичним случајевима оптерећења који су дефинисани у [3], одређен је увођењем одговарајућих граничних елемената.

На основу резултата коначноелементне анализе, закључује се да прелазак носеће конструкције претоварног моста из пројектованог стања, у стање утврђено геодетским мерењима, слика 3, изазива изузетно високе напоне. Напони у појединим елементима структуре превазилазе минималну затезну чврстоћу материјала од кога је израђена ($St\ 37, R_{m,min}=37,0\ kN/cm^2$). Ова чињеница упућује на закључак да је враћање геометрије носеће конструкције претоварног моста у пројектовано стање основни предуслов и први корак који се мора предузети приликом реконструкције и санације.

FE model of original structure was done to describe behavior of structure under these permanent deformations, subjected to load cases, given in [3].

Based on static analysis results, it is concluded that stress field in some structure elements reaches critical stresses of $37kN/cm^2$.

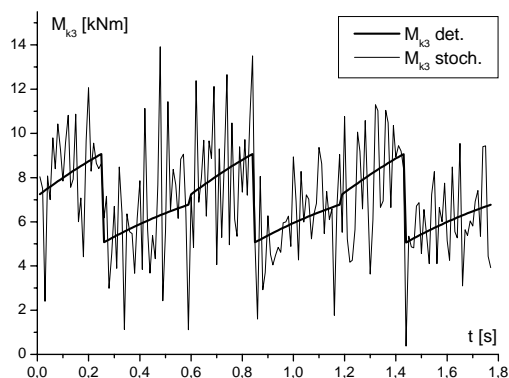
This previous analysis requested urgent reconstruction of stacker-reclaimer structure which already emerge bad behavior in practice. An initial step in reconstruction was reengineering of geometry shape of structure in original design shape. In 2002 two of four machines were subjected to reconstruction. There were added elements on rigid leg substructure and implementation of truss that bonds and stiffen bracing truss with main girders and rigid portal, figure 4. Increasing of stiffness of main girders vertical trusses in vertical plane, thereby increasing of stiffness of

Све ово је условило реконструкцију 2 од постојећа 4 моста, која је извршена 2002. године. Извршено је укрупњавање решетке косника круте ноге и додатно ојачање решеткастом везом косника и главног носача. Повећање крутости вертикалних решетки главних носача у хоризонталној равни, а тиме и подизање крутости целокупне структуре у хоризонталној равни, остварено је повезивањем доњих појасева вертикалних решетки на главним носачима. Приказ положаја решетки за укрупњење круте ноге је дат на слици 4. Такође, на погонима кретања уграђени су склопови хоризонталних точкова чиме се знатно смањује негативан утицај на структуру приликом закошења претоварног моста. Детаљан технички опис реконструкције је дат у [4].

2. Анализа спољашњег оптерећења и случајеви оптерећења

Носећа конструкција претоварног моста изложена је дејству главних и допунских оптерећења. Анализа оптерећења је истоветна анализи оптерећења оригиналне конструкције, као и случајеви оптерећења за статичку анализу [3].

Акцент, при прорачуну оптерећења, је дат за одређивање отпора захватања угља. Ово је одређено оригиналним софтвером [2]. Пример излазног резултата је дат на следећој слици.



Сл. 6. Приказ момента отпора захватања угља
Fig. 6. Deterministic and stochastic estimation of moment of resistance to coal reclaiming

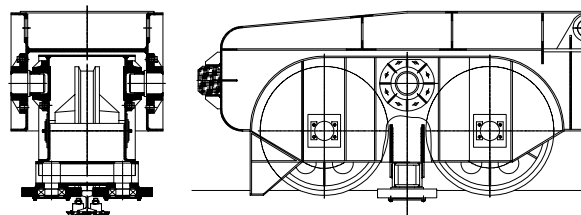
Статички и динамички прорачуни су извршени на коначноелементном моделу претоварног моста. Тежине додатних елемената генерисана су самим програмским пакетом.

3. Статичка анализа

Прорачунска верификација реконструисане структуре претоварног моста извршена је применом методе коначних елемената. Прорачунски модел формиран је на основу модела приказаног у [3], проширивањем прорачунског домена за 20 коначних елемената типа штапа и 6 коначних елемената типа греде, сагласно конструкционом решењу описаном у [4].

Анализа напонско – деформационог стања реконструисане структуре претоварног моста изведена је за 7 случајева оптерећења који су детаљно изложени у [3,4]. Напонско стање у структури, као и поље померања приказани су на сликама 7 и 8, респективно.

whole structure is realized by connecting the lower chords of mentioned trusses. On driving units there are added assemblies of horizontal wheels in order to reduce effects of skewing, fig. 5.



Сл. 5. Склоп хоризонталних точкова
Fig. 5. Addition driving guides

2. External loads acting upon structures and load cases

Structure of stacker-reclaimer is subjected to dead loads and additional loads. Analysis of external loads is the same as for original structure. Load cases for static analysis are also the same [3].

Emphasis is given on additional loads caused by resistances to coal reclaiming which have dynamic and stochastic character. For calculating such loads it is developed original software [2]. This software also enables stochastic characteristics, example shown in fig.6.

All analyses are done by FE analysis. There are developed several structural models. As mentioned, load cases are the same as for original structure. Reconstructed model of structure is additionally subjected to dead loads of added elements. It is developed by FE software.

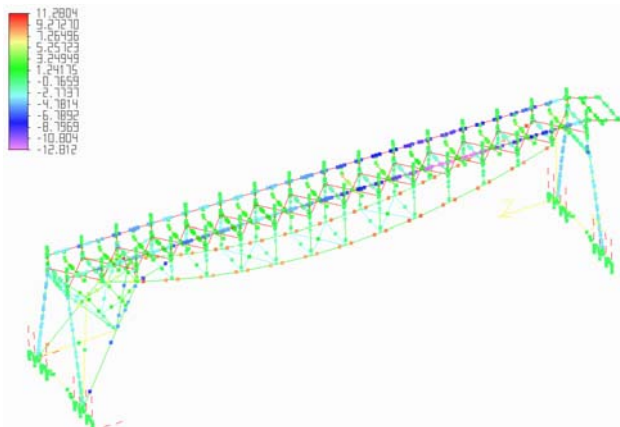
3. Structural analysis

Stress/deformation analysis of reconstructed structure of stacker-reclaimer is done with finite element method, on a model of original structure [3], with additional elements according to reconstruction description.

Stress/deformation analysis of reconstructed structure is performed for 7 load cases, showed in [3,4]. Stress field of structure is presented in figure 7. Deformation shape of structure is given in figure 8.

Максимални напони се јављају у елементима вертикалне решетке (напон затезања $11,3 \text{ kN/cm}^2$) и главном носачу (напон притиска $12,8 \text{ kN/cm}^2$).

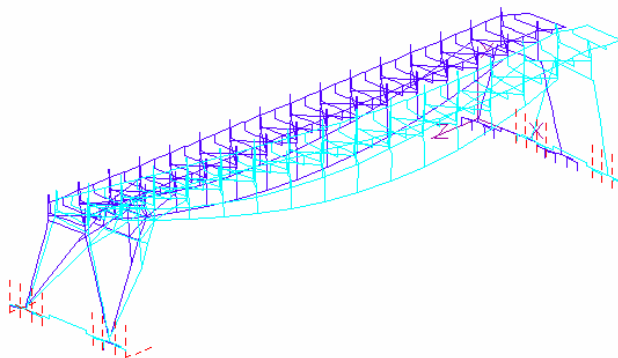
Померање реконструисане структуре у хоризонталној равни (померање референтног чвора 66 у правцу осе X глобалног координатног система – правац кранске стазе) износи $13,2 \text{ cm}$.



Сл. 7. Напонско стање у елементима структуре
Fig. 7. Stress field of structure

Maximum stress values occur in element of vertical truss (tension $11,3 \text{ kN/cm}^2$) and main girders (compression $12,8 \text{ kN/cm}^2$).

Maximum displacements for reconstructed structure in horizontal plane is $13,2 \text{ cm}$ (benchmark joint 66 has $13,2 \text{ cm}$ displacement in direction of global X axis)



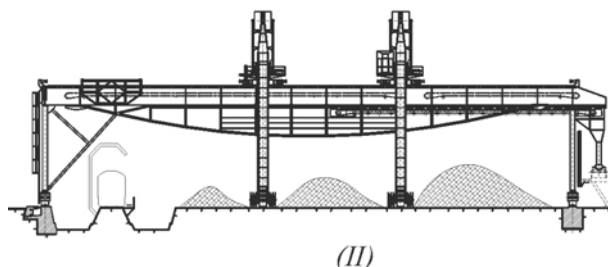
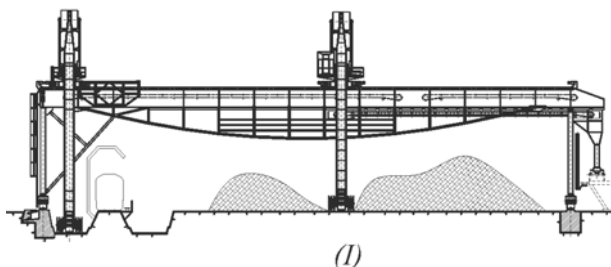
Сл. 8. Приказ деформисаног стања структуре
Fig. 8. Deformed shape of structure

4. Динамичка анализа

Упоредо са статичком анализом структуре претоварних мостова потребно је извршити и динамичку анализу [6]. Оптимизација технолошко-конструктивних параметара није могућа без динамичке анализе, која је доступна пројектантима ових машина услед великог броја програмских пакета за коначноелементну анализу.

Управо због постојања периодичне побудне силе од отпора захватања расутих материјала, претоварни мостови показују у пракси динамичку нестабилност, чак и код мостова реномираних светских произвођача. Динамичко понашање оригиналне носеће конструкције је разматрано за 2 карактеристична режима рада: I-захватање угља из канала и поља, II-захватање угља из поља, слика 9.

Показано је да је носећа конструкција претоварног моста више изложена динамичким утицајима за положај II. Модална анализа је извршена на коначноелементном моделу у програмском пакету САП2000, слика 10. Масе захватних уређаја су додате као концентрисане масе у моделу.



Сл. 9. Карактеристични радни режими / Fig. 9. Characteristic working regimes

4. Dynamic analysis

Along with static analysis it is needed to perform dynamic analysis [4] in order to check and optimize dynamic parameters. Nowadays, numerous FE softwares enable fast and adequate analysis of complex machine structures.

Due to periodic, thereby dynamic, nature of coal reclaiming process these machines show dynamic instability during work, even at world known producers.

Dynamic behavior simulation of original structure is analyzed for 2 critical cases for bridge structure under influence of external loads, i.e. for 2 working regimes of unloading bridge, [5]: I-reclaiming the coal both from trenches and from stockyard, II-reclaiming the coal from stockyard, fig 9.

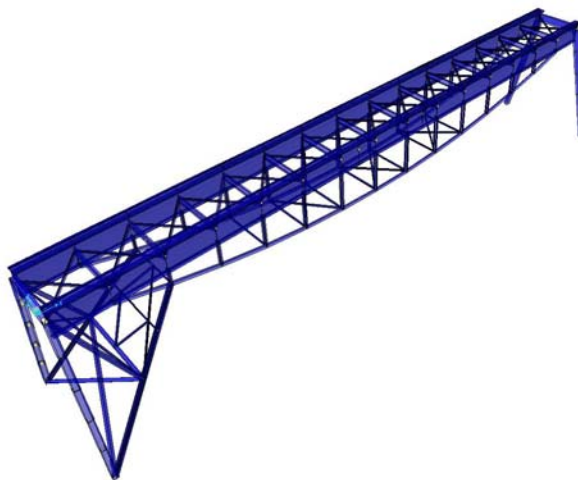
It is concluded that structure of stacker-reclaimer is more subjected to dynamic influences for case II. According to this, it is performed dynamic analysis of reconstructed structure only of case II. FE model of reconstructed structure of stacker-reclaimer is presented on following picture. Masses of booms are inserted as concentrated masses on adequate joints.

На основу модалне анализе у коначноелементном софтверу добијене су основна и остале фреквенције структуре. На слици 11 су приказана прва 4 облика осциловања.

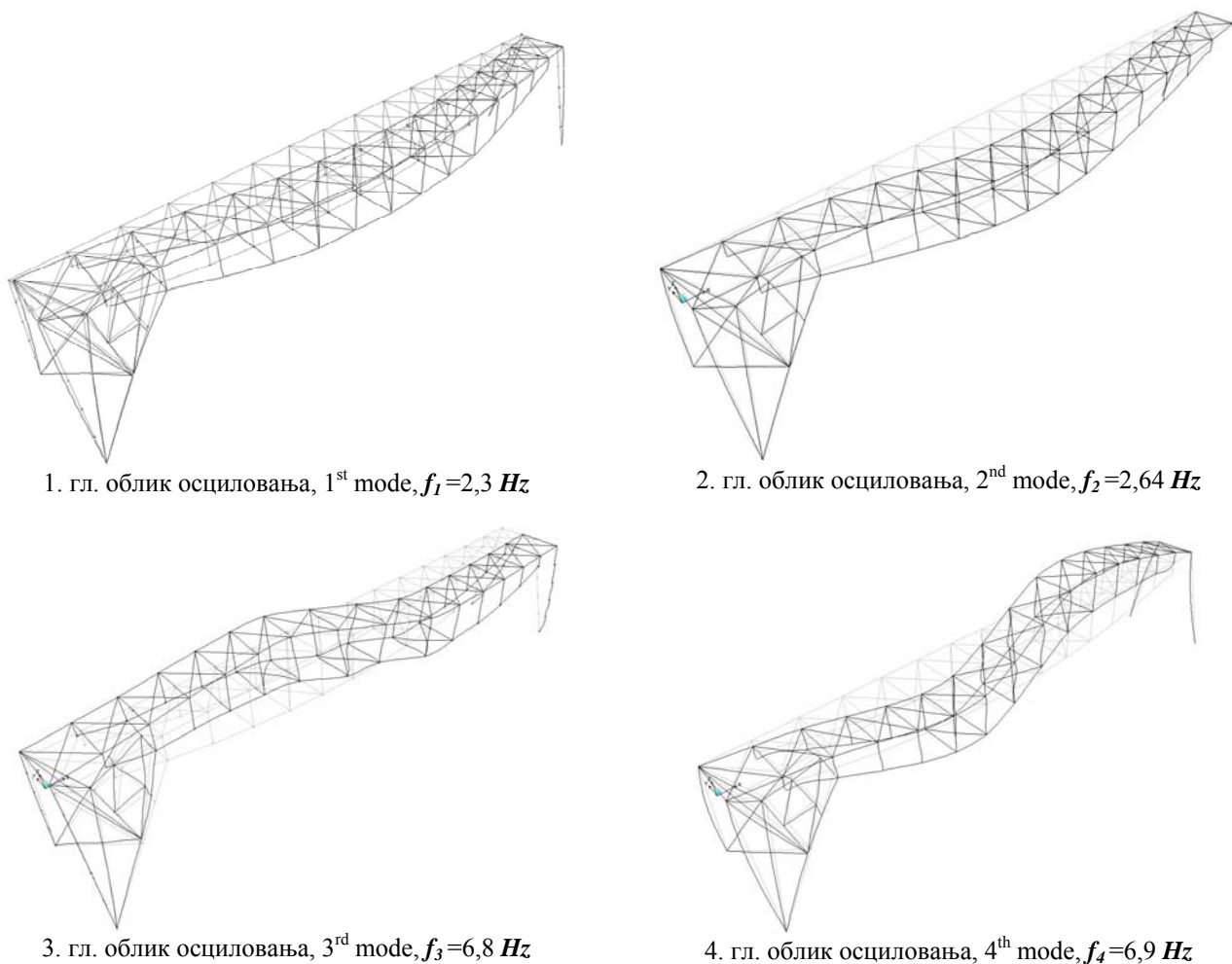
Modal analysis gives mode shapes, natural and following frequencies of structures. There are showed 4 mode shapes at fig. 11.

За поређење вредности биће искоришћене фреквенције модела оригиналне структуре добијене модалном анализом у програму SAP 2000, [5].

Comparison of gained frequencies is done with gained frequencies of original structure, in modal analysis in SAP 2000, [5].



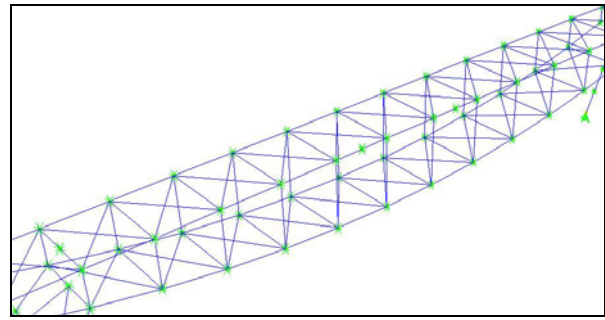
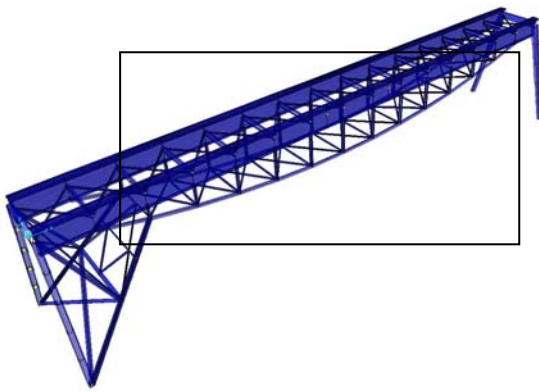
Сл. 10. Коначноелементни модел структуре / Fig. 10. FE model of structure



Сл. 11. Главни облици осциловања / Fig. 11. Modal shapes

Даље укрупњавање хоризонталне решетке на коначноелементном моделу, слика 10, даје основну фреквенцију од 2,4 Hz што је повећање од 4% на основу чега се може закључити да даље повезивање вертикалних решетки нема значајно побољшање са аспекта динамичког понашања моста.

Further bonding of lower chords of vertical trusses, performed on FE model, fig. 11, give natural frequency of 2,4 Hz, i.e. increase of 4 % which show no significant dynamic convenience is gained with further increase of stiffness with this kind.



Сл. 12. Детаљ модела са даљим укрућењем вертикалних решетке
Fig. 12. Detail of model with further bonding of vertical trusses

5. Упоредни приказ резултата

Ниво напонског стања у критичном случају оптерећења, знатно је нижи у односу на напонско стање пројектоване структуре, слика 6. Осим тога, промењена је и локација зоне најоптерећенијих елемената структуре, тако да се максимални напони јављају у елементима вертикалне решетке (напон затезања $11,3 \text{ kN/cm}^2$) и главном носачу (напон притиска $12,8 \text{ kN/cm}^2$). Напони у косницима круте ноге су знатно нижи у од носу на пројектовано стање (максимални напон притиска $8,6 \text{ kN/cm}^2$). Прерасподелом оптерећења унутар структуре остварено је знатно ниже и уједначеније напонско стање реконструисане конструкције моста. Повећање крутости решетке кругог портала, уз истовремено повећање торзионе крутости његових ногу, резултира мањим померањима реконструисане структуре у хоризонталној равни (померање референтног чвора 66 у правцу осе X глобалног координатног система – правац кранске стазе – износи $13,2 \text{ cm}$). Упоредни приказ резултата статичке и динамичке анализе претходне и реконструисане структуре је дат у следећој табели.

Табела 1. Упоредни приказ статичких и динамичких параметара оригиналне и реконструисане конструкције
Table 1. Review of static and dynamic parameters of original and reconstructed structure of stacker-reclaimer

Конструкција <i>Structure</i>	Мах. напон Stress [kN/cm^2]	Мах. померања Displacement [cm]	Основна фреквенција Natural frequency [Hz]	Принудна/основна фрекв. Forced/natural freq. ratio
Оригинална <i>Original</i>	17,7	18,5	2,1	1,23
Реконструисана <i>Reconstructed</i>	12,8	13,2	2,3	1,36

Основна фреквенција реконструисане структуре износи $2,3 \text{ Hz}$. У односу на претходно стање евидентно је повећање основне фреквенције од 10% , као и фреквенција осциловања у хоризонталној равни. Остали облици осциловања немају већу разлику од претходног стања. Ово се објашњава преваходно повећањем крутости у хоризонталној равни што је био један од циљева реконструкције, са минималним повећањем целокупне масе од 2% . За овај претоварни мост већ је одређена фреквенција побуде [6] и она износи $f_{\Omega} = 1,69 \text{ Hz}$. Однос принудне и основне фреквенције износи

$$\frac{f_{\Omega}}{f} = \frac{2,3}{1,69} = 1,36,$$

5. Comparasion of results

Stress field in structure, in worst analysis case, is significantly lower compared to stress field of original structure, fig. x. Moreover, the location of zone of the most loaded elements of structure is changed, so maximum stress values occur in element of vertical truss (tension $11,3 \text{ kN/cm}^2$) and main girders (compression $12,8 \text{ kN/cm}^2$). Stress values in rigid legs bracing are much lower than for designed shape (max. value of compression is $8,6 \text{ kN/cm}^2$). Increasing of stiffness for rigid portal truss, with increase of torsional stiffness of its legs, results in smaller displacements for reconstructed structure (benchmark joint 66 has $13,2 \text{ cm}$ displacement in direction of global X axis). Comparison of main static/dynamic parameters are given in following table.

Natural frequency, gained by modal analysis, for reconstructed structure is $2,3 \text{ Hz}$. Compared to previous structure that is increase of 10% , along with frequencies in horizontal plane.

Vertical plane shaped show no significant changes. This is mainly consequence of increase of stiffness of structure in horizontal plane. Mass increase of whole structure is 2% .

Force frequency for this stacker-reclaimer, due to coal reclaiming process is $f_{\Omega} = 1,69 \text{ Hz}$.

Force/natural frequency ratio is

$$\frac{f_{\Omega}}{f} = \frac{2,3}{1,69} = 1,36.$$

This shows no possibility of entering the first-order resonance domain.

6. Закључак

У раду је изложен пример реализације структуре претоварних мостова која није могла да одговори повећаним експлоатационим захтевима, што је резултирало колапсом система и честим прекидима рада. Провером основних статичких параметара добијено је да претходна конструкција не задовољава доказ чврстоће, као и да виткости одређених елемената прелазе дозвољене вредности. На основу детаљне анализе, превасходно спољашњег оптерећења изазваног отпором захватања угља, предложена је реконструкција мостова у смислу повећања крутости структуре. Са минималним повећањем целокупне масе од 2%, реконструисано решење даје пуну експлоатациону поузданост и безбедност. Ниво напонског стања је смањен, као и деформације структуре под дејством оптерећења. Основна фреквенција структуре је повећана за 10% у односу на оригинално стање, што је на страни сигурности јер је смањена могућност да уђе у домен резонантне области. У пракси, одређене динамичке нестабилности су и даље приметне за конструкцију захватног уређаја са елеваторима, која није била предмет санације.

Коначно, о успешности реконструкције говори податак да у петогодишњој експлоатацији после реконструкције, нису констатовани застоји због отказа носеће конструкције или погона кретања.

Овај рад представља део истраживања у оквиру пројекта Технолошког Развоја ТР 6344 "Истраживање, развој и конструкција машина за претовар и складиштење контејнера и расутих материјала", подржан од Министарства за науку и заштиту животне средине Републике Србије.

на основу кога се може закључити да осцилације не улазе у резонантни домен.

6. Conclusion

Previous analysis show example of structure of stacker-reclaimer which could not correspond with higher exploitation demands. This resulted in often collapses and failures. Estimation of basic static parameters gave no static behavior verification (mostly stress level), along with buckling verification.

Detailed analysis with emphasis on determination of external loads caused by coal reclaiming process suggested reconstruction of structure in order to increase stiffness level of structure. With min. increment of mass of 2%, reconstructed solution give full exploitation verification and safety. Stress level is decreased, as well as displacement level of loaded structure. Natural frequency is increased for 10% which ensures oscillations not to enter resonance domain. In practice, there are present some dynamic instabilities for structure of reclaiming boom which wasn't subject of reengineering.

Finally, success of reconstruction is presented with 5 years lasting exploitation with no failures and collapses of the system because of structure of stacker-reclaimer.

Acknowledgement

This paper is a part of the research project in the field of technological development TR 6344 "Research, development and construction of machines for handling and stocking of containers and bulk materials", supported by Serbian Ministry of Science and Environmental Protection.

Литература - References

- [1] BOŠNJAK, S.: *Bucket wheel trenchers (in Serbian)*, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2001.
- [2] BOŠNJAK, S., JOVKOVIĆ, M., GAŠIĆ, V.: *PREMO, Software for calculating the external loads caused by coal reclaiming process at bridge-type reclaimers*, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2004.
- [3] BOŠNJAK, S., PETKOVIĆ, Z., GAŠIĆ, V., ZRNIĆ, N.: *Pretovarni mostovi sa elevatorima, Deo I:-Identifikacija opterećenja, proračun strukture i zakošavanje*, Tehnika LXI 2006, Mašinstvo 55, br.6.
- [4] BOŠNJAK, S., PETKOVIĆ, Z., GAŠIĆ, V., ZRNIĆ, N.: *Pretovarni mostovi sa elevatorima, Deo II:-Konstrukciono rešenje, tehnologija i proračun rekonstruisane strukture*, Tehnika LXI 2007, Mašinstvo 56, br.1.
- [5] COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc.: *Sap 2000 Analysis reference manual*, Berkeley, California, USA, 2002.
- [6] GAŠIĆ, V.: *Dynamic behavior identification of bridge type stacker – reclaimer with bucket chain booms in power plants*, M. Sc.Thesis (in Serbian), Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2004.
- [7] MAKAR, M.: *Teorija bagerovanja rotornim bagerima*, Rudarski institut, Beograd, 1990.
- [8] SPYRAKOS, C.: *Finite element modeling in engineering practice*, West Virginia Univ., Morgantown 1994.
- [9] TUMA, J., MUNSHI, R.: *Advanced structural analysis*, Schaums outline series, McGraw-Hill, Oklahoma 1971.
- [10] WÖHLBIER, R.H.: *Stacking, Blending, Reclaiming of Bulk Materials*, Trans Tech Public. First Edition 1977.

Адреса аутора - Contact address



Srđan BOŠNJAK, Assoc. Prof. DSc.

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia
sbosnjak@mas.bg.ac.yu



Vlada GAŠIĆ, Ass. MSc.

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia
vgasic@mas.bg.ac.yu



Nenad ZRNIĆ, Ass. Prof. DSc.

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia
nzrnic@mas.bg.ac.yu



Zoran PETKOVIĆ, Prof. DSc.

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia
zpetkovic@mas.bg.ac.yu