

**ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата  
Небојше Б. Гњатовића, дипл. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком бр. 1591/5 од 10.12.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације под насловом

**„УТИЦАЈ КОНСТРУКЦИОНИХ ПАРАМЕТАРА И ПАРАМЕТАРА ПОБУДЕ НА  
ОДЗИВ ДВОПОРТАЛНОГ РОТОРНОГ БАГЕРА У ВАНРЕЗОНАНЦИЈСКОЈ  
ОБЛАСТИ“**

кандидата Небојше Б. Гњатовића, дипл. инж. маш. , студента докторских студија.

Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија подноси следећи

**РЕФЕРАТ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

На докторске студије на Машинском факултету, кандидат Небојша Б. Гњатовић уписан је 2006. године, по наставном плану који је Сенат Универзитета прихватио 2005. године, а по Закону о универзитету из 2002. године. Две године касније, 2007. године, Сенат је дао сагласност на нови наставни план према Закону о високом образовању, који је донесен 2005. године, а по којем докторске студије не могу да трају дуже од 6 година. Одлуком Сената и на основу правног тумачења, студенти докторских студија уписани 2005. и 2006. године, по Закону из 2002. године, у погледу статуса третирају се по старим правилима која се примењују на кандидате са магистратуром. По овим правилима, Небојша Б. Гњатовић је имао обавезу да захтев за одобрење дисертације поднесе до 30.09.2015., што је и учинио и има рок да дисертацију одбрани до 30. септембра 2016. године.

По захтеву кандидата Небојше Б. Гњатовића број 1591/1 од 28.08. 2015. године, и предлога проф. др Срђана Бошњака (ментора) и сагласности Катедре за механизацију број 1591/2 од 11.09. 2015. године, да му се одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија за подношење извештаја о прихватању теме, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је Одлуку број 1591/3 од 24.09.2015. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Срђан Бошњак и Комисија за подношење реферата о теми докторске дисертације у саставу:

- проф. др Срђан Бошњак, ментор,
- проф. др Ненад Зрнић,
- проф. др Александар Обрадовић,

- доц. др Влада Гашић и
- др Миодраг Арсић, научни саветник.

Комисија за писање реферата о прихватању теме и оцену научне заснованости докторске дисертације у саставу:

- проф. др Срђан Бошњак, ментор,
- проф. др Ненад Зрнић,
- проф. др Александар Обрадовић,
- доц. др Влада Гашић и
- др Миодраг Арсић, научни саветник,

поднела је Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду реферат број 1591/4 од 02.12. 2015. године.

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и именовању ментора, број 1591/5 од 10.12.2015., и сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, донетој на седници одржаној 21.12. 2015. године, кандидату Небојши Б. Ђатовићу одобрен је рад на теми докторске дисертације под називом „Утицај конструкционих параметара и параметара побуде на одзив двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области“. За ментора дисертације именован је проф. др Срђан Бошњак.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Небојше Б. Ђатовића, под насловом **„Утицај конструкционих параметара и параметара побуде на одзив двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области“**, припада области техничких наука – машинство, ужа научна област механизација, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Ментор проф. др Срђан Бошњак је шеф Катедре за механизацију Машинског факултета Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор, публиковао је 23 рада у часописима са SCI листе (12 у категорији M21, 3 у категорији M22 и 8 у категорији M23) из области динамике и чврстоће машина за механизацију.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Небојша Б. Ђатовић, дипл. инж. маш., студент докторских студија, рођен је 20. 05. 1982. године у Београду. Основну школу („Дринка Павловић“) и гимназију („Трећа београдска гимназија“) завршио је у Београду. За постигнуте успехе током школовања награђен је дипломом „Вук Стефановић Караџић“. На Машински факултет Универзитета у Београду уписао се 2000. године. Дипломирао је 2006. године са просечном оценом 8,73 и оценом 10 за дипломски рад из предмета Рударске машине. Исте године уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду и положио све испите са просечном оценом 9,90.

Радни однос на Машинском факултету Универзитета у Београду засновао је 2006. године у својству сарадника-истраживача. За асистента за ужу научну област механизација изабран је 2009. године, а реизабран 2013. године. Током 2010. године био је на одслужењу војног рока.

У својству истраживача-сарадника и асистента, кандидат је активно учествовао у извођењу дела наставе (вежби) из предмета Основе грађевинских и рударских машина на основним академским студијама и предмета Елементи машина за механизацију, Дизајн подсистема грађевинских и рударских машина, Рударске и грађевинске машине и Основе динамике рударских и грађевинских машина на мастер академским студијама. Наставни и педагошки рад кандидата високо је вреднован у анкетама спроведеним међу студентима.

Кандидат је коаутор 25 научно-стручних радова, од чега је 10 радова публиковано у научним часописима међународног значаја (9 у часописима са SCI листе), 2 рада су публикована у часописима националног значаја, 13 радова саопштених на међународним скуповима и штампаних у целини, 4 техничка и развојна решења и 36 оригиналних стручних остварења за потребе привреде. Доминантни део научно-стручних остварења кандидата односи се на машине за површинску експлоатацију угља. Осим наведеног, кандидат је учествовао и у реализацији 3 научно-истраживачка пројекта финансирана од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије.

За свој истраживачко-стручни рад, кандидат је добио следећа признања:

- Златну медаљу са ликом Николе Тесле у категорији нових технологија на Међународној изложби проналазака, нових технологија и индустријског дизајна, 2009. године;
- Годишњу награду Привредне коморе Београда за техничко унапређење, 2010. године;
- Годишњу награду Привредне коморе Београда за техничко унапређење, 2013. године;
- Годишњу награду Инжењерске коморе Србије у категорији остварења изузетних резултата на почетку стручне каријере, 2015. године.

Говори енглески језик, а служи се немачким. У свакодневном раду користи програме за пројектовање и коначноелементну анализу носећих конструкција (CATIA, ABAQUS).

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1. Садржај дисертације**

Докторска дисертација Небојше Б. Ђатовића дипл. инж. маш., под називом: „Утицај конструкционих параметара и параметара побуде на одзив двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области“ написана је на српском језику, садржи 161 страну формата А4, 144 слике и дијаграма, 38 табела, 84 нумерисана израза и списак коришћене литературе на пет страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Уводна разматрања;
2. Аналитичко - експериментална идентификација параметара статичке стабилности горње градње двопорталног роторног багера;
3. Динамички модел двопорталног роторног багера;
4. Утицај конфигурације горње градње и крутости ужади система за промену угла нагиба стреле ротора на динамичко понашање структуре;
5. Утицај доминантних маса на динамичко понашање структуре;
6. Утицај броја кашика на ротору на одзив система;
7. Закључак.

Осим наведеног, дисертација садржи предговор, резиме на српском и енглеском језику, садржај, као и биографију аутора и изјаву о ауторству, изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

### **2.2. Кратки приказ појединих поглавља**

У првом поглављу дат је критички осврт на релативно оскудну литературу из области динамике роторних багера. Указано је на основне проблеме идентификације њиховог динамичког понашања. У три целине: (а) моделирање структуре, која је код роторних багера променљиве геометријске конфигурације, (б) моделирање побуде, односно спољашњег оптерећења изазваног отпором копања и (в) експериментална и коначноелементна анализа динамичког понашања роторних багера, приказани су релевантни публиковани резултати у области истраживања. Посебна пажња посвећена је релативно малом броју научних радова који се баве проблемима утицаја конструкцијских параметара на динамичко понашање ове

класе машина. Указано је на основна ограничења метода и модела коришћених у модалним анализама и анализама одзива разматраних, изузетно комплексних динамичких система. Осим тога, дефинисани су предмет и циљеви истраживања и истакнута научна оправданост докторске дисертације.

Основне експлоатационе карактеристике, поузданост и безбедност роторних багера доминантно одређују параметри горње градње. Они могу да се сврстају у три основне групе и то: (а) параметри који одређују статичку стабилност горње градње; (б) параметри који одређују чврстоћу горње градње; (в) параметри који одређују динамичко понашање горње градње. Заједнички именитељ свих наведених параметара јесте маса горње градње односно, њена дистрибуција по структури. Зато се одређивању масе горње градње и положају њеног средишта мора посветити посебна пажња у свим фазама пројектовања роторног багера. У другом поглављу је на примеру развоја пројекта роторног багера SchRs 1600, показано да релативно мала разлика прорачунских маса надградње доводи до релативно великог, неповољног померања њеног тежишта, уз значајно повећање масе противтега неопходног за њено уравнотежавање. Развијен је поступак аналитичко-експерименталне идентификације параметара стабилности горње градње роторних багера. Спрезањем резултата добијених на основу развијеног тродимензионалног (3D) модела горње градње са резултатима вагања извршеног непосредно након завршетка процеса монтаже, у потпуности је идентификована дистрибуција масе надградње и формиран кориговани 3D модел који омогућава да се у целокупном домену промене угла нагиба стреле ротора са довољном тачношћу одреди положај њеног тежишта. Валидација коригованог 3D модела, а самим тим и параметара динамичког модела, извршена је на основу резултата другог вагања, обављеног након корекције (повећања) масе противтега.

У трећем поглављу приказан је поступак аналитичко-нумеричког обликовања просторног динамичког модела двопорталног роторног багера који омогућава и модалну анализу и анализу одзива система у условима континуалне промене конструкционих параметара и параметара побуде. Применом поступка који је у својој докторској дисертацији, одбрањеној 1995. године, развио Бошњак формиран је оригинални математички модел двопорталног роторног багера који омогућава: (а) анализу осциловања просторних деформабилних решеткастих конструкција; (б) коректно спрезање осцилација подструктура горње градње; (в) адекватан унос спољашњег (побудног) оптерећења изазаваног отпором копању и (д) могућност испитивања утицаја варијације конструкционих параметара и параметара побуде на динамичко понашање конструкције. Валидација формираног математичког модела извршена је поређењем резултата модалне анализе са вредностима сопствених фреквенција добијених научно верификованом методом коначних елемената. Добијени резултати показују врло висок ниво корелације о чему најбоље сведоче релативно ниска одступања прве три сопствене фреквенције ( $\approx 1\%$ ). Приликом постављања коначноелементног модела, формираног на бази коригованог 3D модела, примењен је оригинални поступак моделирања система за вешање стреле ротора, који омогућава одржање потенцијалне енергије ужетног система уз изједначавање сила у крацима катурача.

Роторни багери су типични представници структура променљиве геометријске конфигурације, што анализу њиховог динамичког понашања чини изузетно комплексном. Резултати анализе утицаја геометријске конфигурације горње градње на модалне карактеристике система, приказани у четвртном поглављу, указују на чињеницу да сопствене фреквенције достижу екстремуме при различитим нагибима стреле ротора. Дискретним избором вредности угла нагиба стреле ротора и занемаривањем утицаја геометријске конфигурације на динамичко понашање структуре чини се грешка суштинске природе. Међутим, наведеном анализом доказано је да разматрани параметар нема значајног утицаја на модалне карактеристике система, па је хоризонтални положај стреле ротора усвојен као референтан при анализи утицаја осталих разматраних конструкционих параметара на динамичко понашање конструкције двопорталног роторног багера. Због своје сложене геометрије, разматрана конструкција двопорталног роторног багера нема „чистих“ облика

осциловања. Осциловање система у вертикалној равни доминантно је у првом моду, док четврти и пети мод представљају комбинацију осциловања система у вертикалној равни и торзионих осцилација стреле ротора. Анализе утицаја конфигурације горње градње и крутости ужади система за вешање стреле ротора на модалне карактеристике структуре указују на чињеницу да оба разматрана параметра (угао нагиба стреле ротора и крутост ужади) доминантно утичу на прву, четврту и пету сопствену фреквенцију, док је њихов утицај на остале анализиране сопствене фреквенције практично занемарљив. Овакав резултат је очекиван с обзиром на чињеницу да се приликом промене угла нагиба стреле ротора мења и активна дужина ужади, а тиме и крутост система вешања стреле ротора. Анализом прираштаја релативних вертикалних и бочних померања референтних тачака појасева стреле ротора, такође приказаној у оквиру четвртог поглавља, показано је да крутост ужади система за вешање не утиче на торзионе осцилације стреле ротора, чиме је делимично оповргнута једна од полазних хипотеза истраживања.

У петом поглављу приказане су анализе утицаја маса које имају доминантан утицај на динамичко понашање система: масе ротора, погона ротора и противтега. Указано је на чињеницу да се доминантне масе система могу мењати током експлоатације роторног багера и да се њихов утицај на динамичко понашање конструкције мора разматрати у континуалном, инжењерски рационалном домену. Показано је да се приликом варирања масе ротора са погоном, у условима одржања средишта маса горње градње, јављају резонантна стања система. Модалном анализом дефинисане су комбинације вредности параметара при којима систем улази у резонанцију. Доказано је да динамички коефицијенти прописани одговарајућом техничком регулативом (пре свега, стандард DIN 22261), односно из њих изведена гранична убрзања референтних тачака, представљају добру заштиту система од појаве резонанције. Осим тога, доказано је да разматрана конструкција двопорталног роторног багера, код које су генералисана убрзања референтних тачака система нижа од граничних, осцилује у области довољно далекој од резонантних стања. Приказан је поступак дефинисања критичних области односно, одређивања комбинација вредности параметара при којима се могу јавити негативни динамички ефекти. Показано је да средиште ротора (тачка продора осе ротора кроз вертикалну раван симетрије кашика) за коректно обликовану конструкцију има највећу осетљивост на појаву резонантних стања и представља добар индикатор динамичког понашања система. Међутим, доказано је да се формирањем критичне области коришћењем критеријума о ограничењу вертикалног и бочног убрзања центра ротора занемарују одређене комбинације вредности параметара које могу да доведу до појаве негативних динамичких ефеката.

Пројектовању ротора са кашикама, као основном подсистему роторног багера, мора се посветити посебна пажња јер он у потпуности одређује учинак и експлоатационо понашање машине. Грешке настале у фази конципирања техничког решења готово је немогуће отклонити након што је машина произведена. Анализа утицаја броја кашика ротора ( $n_k$ ) на динамичко понашање конструкције двопорталног роторног багера, приказана у шестом поглављу, извршена је уз одржавање константних вредности параметара погона ротора пројектованог теоријског капацитета. Број кашика на ротору вариран је у континуалном домену како би се указало на ниво утицаја резонантних стања (25 резонантних стања у фреквентном опсегу до 4 Hz), на динамичко понашање конструкције. Фреквентном анализом утврђено је да за  $n_k = 9, 10, \dots, 24$  не долази до појаве резонанција. Међутим, анализом одзива система показано је да су само у два од шеснаест разматраних случајева задовољени критеријуми ограничења убрзања референтних тачака система. Анализа померања показала је да управо у тим случајевима не постоји опасност од уласка система у резонанцију. Из скупа могућих решења (решења која задовољавају критеријуме прописане техничком регулативом) на основу критеријума минималног убрзања средишта ротора, усвојен је оптимални број кашика на ротору. О ваљаности приказаног поступка усвајања оптималног броја кашика на ротору сведоче следеће чињенице: (а) максимална оптерећења ротора остају константна без обзира на број кашика; (б) коефицијенти неравномерности и динамичности

спољашњег оптерећења нижи су од оних добијених за базни модел машине; (в) основна фреквенција побуде виша је од основне фреквенције за базни модел машине; (г) максимална и амплитудна вертикална и бочна померања средишта ротора нижа су од одговарајућих величина код базног модела машине.

У завршном, седмом поглављу дисертације презентирана је синтеза парцијалних закључака о резултатима истраживања у претходним поглављима дисертације. Изнети су детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата истраживања. Истакнут је научни допринос дисертације као и могућност примене остварених резултата приликом решавања конкретних инжењерских проблема.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Роторни багер, као машина-копач и прва у ланцу система површинске експлоатације, доминантно одређује карактеристике поменутог система. Први роторни багер произведен је и уведен у експлоатацију 1916. године на површинском копу „Бергвиц“ у Немачкој. Захваљујући интензивном развоју у протеклих сто година, роторни багери стекли су значајне предности у односу на багере цикличног дејства и багере ведричаре. Међутим, природну тежњу за сталним унапређивањем перформанси роторних багера, првенствено капацитета, није увек у довољној мери пратила методика прорачуна као ни технологије производње и експлоатације, о чему сведоче релативно честе хаварије поменутих машина, не само на нашим површинским коповима, већ и на коповима земаља које имају дужу традицију експлоатације разматране класе машина. Заједнички именитељ отказа свих висококапацитетних машина, којима припадају и роторни багери, јесу врло високи индиректни губици настали застојем производње, који готово увек вишеструко премашују губитке изазване директном материјалном штетом. О изразито негативним економским последицама отказа упечатљиво говори и податак да укупни трошкови отказа у САД и Европи износе 4% БДП.

Основни узроци отказа роторних багера су: (а) грешке настале током пројектовања; (б) грешке настале током производње и монтаже; (в) грешке у експлоатацији; (г) екстремна дејства околине. Природно, откази роторних багера често настају суперпонирањем негативних утицаја више наведених основних узрока.

Рад роторних багера карактеришу појаве врло израженог динамичког карактера, чији су основни узроци: (а) периодични улазак/излазак кашика из захвата са тлом; (б) неуравнотеженост елемената погонских система, ротора и обртних делова тракастих транспортера; (в) удари комада откопаног тла током пражњења кашика. У инжењерској пракси и важећој техничкој регулативи малобројних земаља које производе роторне багере, недовољно познавање динамичких процеса решава се применом квазистатичке методе. Тиме се повећава интензитет оптерећења, али се оно и даље третира као статичко.

Недозвољене деформације, односно ломови подсистема роторних багера најчешће су последица пропуста у анализи стварних динамичких процеса и њима изазваних оптерећења. У постојећој литератури не постоје математички модели двопорталних роторних багера који одржавају просторни карактер проблема. Наведене чињенице недвосмислено сведоче о савремености, оригиналности и значају истраживања динамичког понашања двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области, које представља предмет истраживања у оквиру докторске дисертације.

У раду је постављен оригинални просторни динамички модел двопорталног роторног багера који омогућава и модалну анализу и анализу одзива система у условима континуалне промене конструкционих параметара и параметара побуде. Техничке карактеристике роторног багера SchRs 1600, типичног представника класе двопорталних роторних багера, усвојене су као параметри базног динамичког модела. Валидација параметара динамичког модела извршена је спрежањем резултата добијених на основу развијеног 3D модела горње

градње са резултатима вагања спроведеног непосредно након завршетка процеса монтаже. Презентираним оригиналним поступком аналитичко-експерименталне идентификације параметара стабилности горње градње роторних багера, у потпуности је идентификована дистрибуција масе надградње и формиран кориговани 3D модел који омогућава да се у целокупном домену промене угла нагиба стреле ротора са довољном тачношћу одреди положај тежишта надградње. Коначноелементни модел, формиран на основу коригованог 3D модела горње градње, омогућава одржање потенцијалне енергије ужетног система вешања стреле ротора, обезбеђујући еквивалентност оптерећења сваког од 24 крака ужета. Формиран је оригинални просторни математички модел горње градње двопорталног роторног багера на основу кога је извршено истраживање утицаја конструкционих параметара и параметара побуде на динамичко понашање структуре.

Параметри који доминантно одређују динамичко понашање могу да се мењају током експлоатације роторних багера, па је при анализи одзива система неопходно узети у обзир и варијабилност тих параметара у инжењерски рационалном дијапазону.

Одређивање комбинација вредности параметара које доводе до појаве резонанције система од изузетног је значаја са становишта одржања интегритета конструкције. Не мањи значај са инжењерског аспекта, има и одређивање критичних области у којима се могу јавити неповољни динамички ефекти. Динамички коефицијенти прописани стандардом DIN 22261, односно из њих изведена убрзања референтних тачака система, у савременој инжењерској пракси користе се као граничне вредности приликом експерименталног испитивања динамичког понашања роторних багера. У оквиру дисертације доказано је да наведена гранична убрзања представљају добру заштиту конструкције од појаве резонанције и коришћена су за дефинисање граница критичних области.

Избор оптималног броја кашика на ротору извршен је на основу анализе резултата утицаја варијације поменутог параметра на модалне карактеристике и одзив система. На основу резултата модалне анализе могу да се одреде вредности параметра при којима систем улази у резонанцију, међутим не може се донети поуздан закључак о утицају блискости одређених резонантних стања на одзив система. Усвајање броја кашика на ротору искључиво на основу резултата модалне анализе, приступ који доминира у постојећој литератури, не обезбеђује увек повољно динамичко понашање структуре. Зато је у дисертацији избор оптималног броја кашика извршен применом критеријума минималног убрзања средишта ротора.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Истраживања утицаја конструкционих параметара на динамичко понашање роторних багера врло су оскудно заступљена у постојећој литератури. Могући разлози су: (а) изузетна комплексност конструкције, што у значајној мери отежава моделирање структуре; (б) изузетно висока цена експерименталних истраживања, уз додатно ограничење у броју параметара који се могу мењати на већ произведеној машини; (в) ограничења коначноелементне анализе која се пре свега огледају у дискретности методе.

Списак литературе која је коришћена приликом израде дисертације дат је у посебном поглављу. Прегледом листе коришћене литературе закључује се да је кандидат имао на располагању и проучио сву доступну референтну литературу. Она је била полазна основа за приказ постојећег стања у области истраживања, али и основа за избор поступка моделирања двопорталног роторног багера као изузетно комплексног динамичког система, као и за усвајање методе моделирања спољашњег (побудног) оптерећења изазваног отпором тла копању. Резултати експерименталних истраживања динамичког понашања роторних багера коришћени су у сврху индиректне валидације резултата добијених током истраживања.

У оквиру дисертације кандидат се позива на анализе, резултате и закључке објављене у референтним монографијама, докторским дисертацијама, магистарским тезама, стручним уџбеницима, радовима у међународним и домаћим часописима и релевантним међународним стандардима. Кандидат је коректно проучио и цитирао литературне изворе.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Током реализације циљева истраживања и провере полазних хипотеза коришћене су следеће методе и технике истраживања:

- метода систематизације и класификације захваљујући којој су, на основу прегледа литературе и анализе у њој приказаних резултата, утврђени правци истраживања у докторској дисертацији. Литературни извори посебан значај су имали приликом: (а) избора оптималне методе моделирања двопорталног роторног багера; (б) усвајања методе моделирања спољашњег оптерећења изазваног отпором тла копању и (в) индиректне валидације резултата истраживања у оквиру дисертације;
- методе 3D моделирања чијом применом је обликован просторни модел двопорталног роторног багера;
- аналитичко-експерименталне методе одређивања тежине и положаја тежишта горње градње роторног багера на основу којих је формиран кориговани 3D модел који омогућава да се са довољном тачношћу одреди положај тежишта надградње у целокупном домену промене угла нагиба стреле ротора;
- метода коначних елемената на основу које су одређени сви параметри неопходни за формирање редукованог динамичког модела;
- методе аналитичке механике на основу којих је постављен оригинални просторни динамички модел двопорталног роторног багера који омогућава модалну анализу и анализу одзива система у условима континуалне промене конструкционих параметара и параметара побуде;
- методе доказивања и оповргавања на основу којих су доказане полазне хипотезе истраживања: (а) геометријска конфигурација горње градње (нагиб стреле ротора) не утиче значајно на вредности сопствених фреквенција; (б) торзионе осцилације стреле ротора не преносе се на стрелу противтега; (в) маса ротора са погоном значајно утиче на одзив горње градње, чак и у условима одржавања положаја њеног средишта маса; (г) промена броја кашика на ротору, уз одржање теоријског капацитета роторног багера, значајно утиче на интензитет побуде изазване отпором откопавања и одзив система; (д) ограничавањем интензитета прорачунских убрзања референтних тачака система могуће је смањити ризик од појаве резонанцијских стања. Полазна хипотеза која гласи: „крутост ужади система за вешање стреле ротора доминантно утиче на њене торзионе осцилације, као и на осциловање горње градње у вертикалној равни“, делимично је оповргнута. Наиме, крутост ужади система за промену угла нагиба стреле ротора утиче на осциловање система у вертикалној равни, али нема утицаја на торзионе осцилације стреле ротора.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Применом просторног динамичког модела двопорталног роторног багера развијеног у докторској дисертацији, уз увођење ограничења у убрзањима референтних тачака система, могуће је већ у фази пројектовања одредити критичне области и избећи појаву нежељених динамичких ефеката. Тиме се у значајној мери смањује ризик од појаве отказа и ломова подструктура разматране класе машина. Резултати истраживања у оквиру докторске дисертације представљају допринос у области анализе динамичког понашања роторних багера, пре свега имајући у виду чињеницу да се у инжењерској пракси и важећој техничкој регулативи недовољно познавање динамичких процеса решава применом квазистатичке методе. Презентиран поступак моделирања двопорталног роторног багера као изузетно комплексног просторног динамичког система, као и оригинални поступци одређивања комбинација вредности параметара које могу довести до нежељених динамичких ефеката, значајну улогу могу имати и у процесима реконструкције и модернизације разматране класе машина намењене за вишедеценијску експлоатацију у екстремно тешким радним условима.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знање неопходно да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме, примењујући савремене методе теоријског и експерименталног карактера, да користи расположиву литературу и да успешно влада савременим истраживачким методама. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Ова дисертација несумњиво је проширила постојећа знања и представља научни допринос у области динамике роторних багера. Остварени научни допринос докторске дисертације „Утицај конструкционих параметара и параметара побуде на одзив двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области“ огледа се у следећем:

- развијен је поступак аналитичко-експерименталне идентификације параметара статичке стабилности горње градње роторних багера, који доминантно одређују њено динамичко понашање. Спрезањем резултата добијених на основу 3D модела горње градње са резултатима вагања извршеног непосредно након завршетка процеса монтаже, у потпуности је идентификована дистрибуција маса горње градње и формиран кориговани 3D модел који омогућава да се са довољном тачношћу одреди положај њеног тежишта, у целокупном домену промене угла нагиба стреле ротора;
- постављен је оригинални просторни динамички (математички) модел двопорталног роторног багера који омогућава модалну анализу и анализу одзива система при варијацији промене конструкционих параметара и параметара побуде;
- развијен је поступак за одређивање подскупова конструкционих параметара и параметара побуде при којима систем улази у стање резонанције;
- на основу критичке анализе граничних убрзања и динамичких коефицијената наведених у референтној литератури и техничкој регулативи (стандардима) закључено је да наведена гранична убрзања представљају добру заштиту система од појаве резонанције;
- развијен је поступак за одређивање критичних области појединих параметара система, у којима се могу јавити негативни динамички ефекти;
- развијен је поступак избора оптималног броја кашика на ротору са аспекта динамичког понашања система.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Током развоја пројекта роторног багера, као и током његове експлоатације, могуће су промене параметара статичке стабилности (маса горње градње и положај њеног средишта), који доминантно утичу на динамичко понашање машине. Током израде дисертације, развијен је оригиналан поступак спрезања резултата експериментално-нумеричких истраживања и формирања коригованог 3D модела, који омогућава да се при било којој конфигурацији горње градње, са довољном тачношћу одреди положај њеног тежишта.

О значају развијеног просторног динамичког (математичког) модела горње градње двопорталног роторног багера недвосмислено говоре следеће чињенице (а) недозвољене деформације, односно ломови подсистема роторних багера најчешће су последица пропуста у анализи стварних динамичких процеса и њима изазваних оптерећења; (б) у постојећој литератури не постоје математички модели двопорталних роторних багера који одржавају просторни карактер проблема.

На основу развијеног математичког модела, дефинисане су комбинације вредности параметара које доводе до појаве резонанције система, што представља значајан допринос када је реч о пројектовању и експлоатацији роторних багера. Осим тога, развијен је и оригиналан поступак одређивања оптималног броја кашика на ротору, заснован на анализи динамичког одзива структуре, што, такође представља важан искорак у дефинисању конструкционих параметара машине.

Резултати остварени током израде дисертације представљају драгоцену подлогу за конципирање и развој конструкције роторних багера, као и за реконструкцију и модернизацију ове класе машина намењене за вишедеценијску експлоатацију.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Део доприноса докторске дисертације верификовани су у радовима које је кандидат публиковао у међународним часописима који су на SCI листи.

##### Категорија M21:

1. Arsić, M., Bošnjak, S., Zrnić, N., Sedmak, A., **Gnjatović, N.**: Bucket wheel failure caused by residual stresses in welded joints, - *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 2, pp. 700-712, 2011 (IF=1.086) (ISSN 1350-6307).
2. Bošnjak, S., Savićević, S., **Gnjatović, N.**, Milenović, I., Pantelić, M.: Disaster of the bucket wheel excavator caused by extreme environmental impact: Consequences, rescue and reconstruction, - *Engineering Failure Analysis*, vol. 56, pp. 360-374, 2015 (IF=1.028) (ISSN 1350-6307).

##### Категорија M23:

3. Bošnjak, S., **Gnjatović, N.**, Savićević, S., Pantelić, M., Milenović, I.: Basic parameters of the static stability, loads and strength of the vital parts of the bucket wheel excavator's slewing superstructure, - *Journal of Zhejiang University - SCIENCE A*, Article in press, 2015 (IF=0.882) (DOI: 10.1631/jzus.A1500037).

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Утицај конструкционих параметара и параметара побуде на одзив двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области**“ кандидата Небојше Б. Ђатовића, дипл. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за оцену и одбрану констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду.

На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика значајна и актуелна у стручној и научној јавности, констатује се да је кандидат Небојша Б. Ђатовић, дипл. инж. маш., студент докторских студија, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. Кандидат је остварио оригиналне резултате из области динамике роторних багера, користећи при том расположиву литературу и резултате експерименталног истраживања. Резултати истраживања су систематично обрађени и на основу њих изведени су вредни закључци о динамичком понашању горње градње двопорталног роторног багера, који су већ примењени за решавање конкретних инжењерских проблема. Научна и стручна јавност је упозната са резултатима истраживања публикавањем два рада у врхунском међународном часопису (категорија M21), једног рада у часопису међународног значаја

(категорија M23), као и реализацијом пројекта идентификације параметара статичке стабилности и чврстоће двопорталног багера који се налази у експлоатацији у РБ „Колубара“.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област Механизација, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије и упути га Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање, а дисертацију **„Утицај конструкционих параметара и параметара побуде на одзив двопорталног роторног багера у ванрезонанцијској области“** кандидата Небојше Б. Гњатовића, дипл. инж. маш. , студента докторских студија, стави на увид јавности.

У Београду, 25.01. 2016. године

#### **ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

проф. др Срђан Бошњак  
Универзитет у Београду – Машински факултет

проф. др Ненад Зрнић  
Универзитет у Београду – Машински факултет

проф. др Александар Обрадовић  
Универзитет у Београду – Машински факултет

доц. др Влада Гашић  
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Миодраг Арсић, научни саветник  
Институт за испитивање материјала Србије